المنظمة العربية للترجمة

كينيث س. ديفيس

ما بعد النفط

ترجمة

صباح صدّيق الدملوجي

بدعم من مؤسّسة محمد بن راشد آل مكتوم

توزيع: مركز دراسات الوحدة العربية

المحتويات

مكتبة نرجس PDF
www.narjes-library.blogspot.com

الإهداء إلى مايكل

لكل ما علمني إياه

إن أي شخص يعتقد أن النمو الأُسّي
يمكن أن يستمر إلى الأبد في عالم محدود
هو إما مجنون، أو عالِم اقتصاد

كينيث إ. بولدنغ
(Kenneth E. Boulding)

مقدمة المترجم

كان القرن العشرون، الذي ودّعناه قبل بضع سنين، قرنَ النفط بامتياز، فرغم أن النفط كان معروفاً منذ الآف السنين، ورغم أن صناعة النفط الحديثة بدأت في أواسط القرن التاسع عشر، إلاّ أنها لم تبلغ أشدها إلاّ مع مطلع القرن العشرين. كانت هذه الصناعة في العقود الأولى من عمرها معنية باستخلاص الكيروسين من النفط الخام للاستخدام في الإنارة، أما بقية مكونات النفط الخام، فلم تكن إلا مواداً عَرَضية قد يستفاد من الجزء الثقيل منها في إيقاد المراجل، ولم يُعتبر البنزين فيها إلا ناتجاً عرضياً خطراً ومزعجاً.

مع اختراع ماكنة الاحتراق الداخلي العاملة بالبنزين وما بني عليها من سيارات ووسائل نقل، فُتح الباب الذي استوعب صناعة النفط على مصراعيه، فاستند النفط ومحرك الاحتراق الداخلي أحدهما إلى الآخر، ليغزوَا العالم، وعزز هذه العلاقة أكثر اختراعُ محرك الديزل بعد عقد أو عقدين من الزمن، ثم تلا ذلك اختراع التوربين الغازي، الذي أصبح المحركَ الوحيد الذي يستخدمه الطيران التجاري والحربي.

كان تأثير النفط على حياة الإنسان في القرن العشرين واسعاً وعميقاً، إلى درجة لم يتنبأ بها أيٌّ ممن كتبوا عن التوقعات

المستقبلية، فرغم ما تصوروه عن التقدم العلمي والتكنولوجي، لم يتوقع أحد منهم السيارة مثلاً.

وإذا ما أضفنا تأثير الكهرباء، وهو نوع من الطاقة لا نستطيع أن نقصر تذليله وانتشاره على المصادر النفطية، إلى الأثر الذي أحدثته مكائن الاحتراق الداخلي، فسنرى أنهما كانا المحركين اللذين رفعا من مستوى حياة البشر على طول الكرة الأرضية وعرضها، ومنعا وقوع المجاعات، على الأقل أن لم يكونا قد نشرا الرخاء في كافة أصقاع الأرض خلال القرن العشرين.

وسواء أكان النفط مادة ستنضب في المستقبل المنظور أو بعد زمن أطول، أو أنه ـ كما تقول بعض الآراء ـ مادة تفرزها الأرض وستكون متوفرة باستمرار، فإن الإنسان قد انطلق غير آبه بمستقبل أحفاده وغير مكترث بالتلوث الذي يجلبه حرق المواد الهيدروكاربونية، يستخدم ويحرق هذه المادة المبتذلة التي كانت متوفرة بأسعار خيالية في تدنيها(*) فكل منا يحرق كميات كبيرة من المنتوجات النفطية لمواصلاته وحسب مسخّراً طناً ونصف من المعدن والمطاط واللدائن وغيرها بهيئة مركبة غالباً ما يكون هو الفرد الوحيد فيها من غير تفكير. كان اتكاله على المشتقات النفطية شبه كلي، فالنقل البحري الذي اعتمد قوة الريح لآلاف السنين نسي هذا المصدر الذي يتيسر لمرتادي البحار دونما ثمن، ولجأ إلى المحركات الميكانيكية، التي وفر الفحم في البدء، ثم النفط، القوة لها، في حين يمكن

[إن الهوامش المشار إليها بأرقام تسلسلية هي من وضع المؤلف. أما المشار إليها بعلامة (*) فهي من وضع المترجم].

(*) كان نفط الخليج العربي يباع مثلاً حتى بداية سبعينيات القرن العشرين بنحو دولار ونصف للبرميل الواحد، أي أن سعر البرميل منه كان أقل من سعر وجبة غداء في مطعم أوروبي بسيط آنذاك.

لأشرعة ذات تصاميم ومواد حديثة أن توفر نصف استهلاك الوقود النفطي المستخدم في النقل البحري. ورحنا أيضاً يباهي بعضنا بعضاً بطول سياراتنا وسرعتها، وقمنا بتحويل ليل شوارع عواصمنا وحواضرنا إلى بحار من الأنوار تبهر الأبصار وتفوق إشراق نور الشمس في رابعة النهار. وفي حين كان يمكن لمحركات توربينية ذات رفاص (Turbopropellers) أن توفر ثلاثين بالمائة من الوقود المستخدم في الطائرات مقارنة بالمحركات النفاثة البحتة، فضّلنا النوع الثاني، كي نوفر ساعتين أو نحو ذلك من زمن السفرة من لندن إلى نيويورك.

كان الأميركيون السبّاقين في استهلاك المشتقات النفطية بصورة تنافي العقلانية، وربما كان توفر النفط لديهم مقارنة بسواهم من أمم الأرض الصناعية سبباً في ذلك. ولا ريب، من ناحية أخرى، أن النفط وتوفره واستخدامه الكثيف في أميركا كان من أهم العوامل التي دفعت باقتصادها وصناعتها خلال العقود الأولى من القرن العشرين إلى المقدمة، بحيث فاقت الدول الأوروبية التي كانت قبيل ذلك سابقة لها في التقدم العلمي وفي التطور الصناعي.

لم تمنع تلك اللاعقلانية على المستوى القومي الأميركي مفكرين أميركيين عن الوعي بمحدودية النفط وبخطورة نفاده أو حتى شُحّه، فكانوا سباقين أيضاً في هذا المجال، وكان م. كينغ هابرت (M. King Hubbert) من أوائل من كتب عن الموضوع، محاولاً إيقاظ الوعي الوطني، ووعي أصحاب القرار السياسي في بلده على وجه التخصيص.

مؤلف هذا الكتاب البروفسور كينيث ديفيس، وحسب قوله أحد تلامذة هابرت في ما يتعلق بنظرية نضوب النفط، أخذ على عاتقه بعد وفاة هابرت حمل لواء المناداة بضرورة استخدام ما تبقى لنا من النفط بحكمة إلى حين تيسّر مصادر بديلة وملائمة للطاقة تتميز بالمعقولية وبضآلة أثرها البيئي.

لكن هابرت وديفيس كلاهما جيولوجي، ومنظور الجيولوجي - حسبما يفيد ديفيس نفسه - هو خارج العادي الذي نرتئيه نحن الأغلبية الساحقة من البشر من غير الجيولوجيين، فالجيولوجي يفكّر بملايين السنين، ويحاول أن يقيّم ما هو موجود تحت قشرة الأرض من غير الظاهر للعيان بالآف الأمتار. لذا، فما قد يراه ربما يختلف عما يراه الغير، وفي تلك الرؤية قد يكون هناك صحيح إنما خفي عن الغير، وقد يكون ما هو من باب الخيال أكثر مما هو من الواقع. وليس في هذا أي انتقاص من أفكار البروفسور ديفيس، فهو رجل علمي واسع النطاق جداً وعلمه يتجاوز الجيولوجيا والنفط وعلم الصخور وعلم المتحجرات وما يقع بين هذه العلوم، وآراؤه - وإن كنت لا أتفق مع البعض منها - تبقى آراء قيمة لا أبتغي الجدال معها.

إنه لمن الأمانة العلمية، مع ذلك، أن أذكر بعض الحقائق، التي ربما تكون أربع سنوات انقضت، مذ نشرت الطبعة الأولى لهذا الكتاب، قد كشفت عنها.

يعتز ديفيس - برأي هابرت - بوصول إنتاج النفط في الولايات المتحدة ذروته عام 1970. واعتزازه هذا في موضعه، إذ إن ما تنبّأ به هابرت عام 1956 كان صحيحاً ودقيقاً، وتحقق كما قال، وذلك ينمّ حقاً عن تقييم دقيق واستقراء منطقي. لكن الأمر في ما يتعلق بذروة الإنتاج النفطي على المستوى العالمي أمر مختلف، فالمعلومات التي كانت متوفرة لمن يريد الاستقراء من خلالها بالنسبة للولايات المتحدة في خمسينيات القرن العشرين تميزت بالدقة والموثوقية. وكذلك، فإن جيولوجية الأراضي الأميركية كانت قد أُشبعت دراسة وتمحيصاً عبر قرن من الزمن آنذاك، وقد تأيدت تلك الدراسة من خلال حفر مئات الآلاف من الآبار التي أزاحت عن الجيولوجيين عبء تقدير طبيعة الأرض على عمق آلاف، لا بل عشرات آلاف الأقدام، ويسرت لهم

رسم صورة ثلاثية الأبعاد للقشرة الأرضية التي يتوقع تواجد النفط والغاز فيها.

ورغم ذلك فنحن نسمع اليوم عن اكتشافات جديدة لحقول هائلة في ولاية داكوتا الشمالية تشكل، حسب رأي هيئة المسح الجيولوجي للولايات المتحدة، «أكبر تجمع متصل للنفط تم تقييمه من قبلهم»، وتبلغ كمية النفط القابل للاستخراج في هذا الحقل المدعو بحقل باكن (Bakken) كتقدير أولي نحو 4,3 مليار برميل، وهذا يمثل زيادة في احتياطي الولايات المتحدة تبلغ نحو 15٪، وهذا الرقم قابل للمراجعة أيضاً.

وهناك بالطبع من يدّعون بأن النفط مادة ذات أساس غير عضوي. وأن النفط والغاز مواد تُفرز من باطن الأرض لتستقر في طبقات صخرية ملائمة. ورغم وجود دعاة لهذه النظرية حتى اليوم، إلا أنه من الواضح أنها فقدت بريقها ولم تستطع وضع أسس علمية رصينة تؤيدها! لكن الخلاف الأكثر معقولية مع البروفسور ديفيس يأتي من جهات لا تختلف معه على نضوب النفط، إنما تختلف معه على التوقيت. الحقيقة أن إصرار ديفيس على تحديد يوم بالذات، وهو يوم عيد الشكر الأميركي الموافق 4 تشرين ثاني/نوفمبر 2005، على أنه يوم بلوغ إنتاج النفط على المستوى العالمي ذروته، هو أمر يصعب تقبله، فبخلاف تقييم الوضع للولايات المتحدة، يعتري تقييم احتياطيات العالم النفطية المكتشفة والمتوقعة والممكنة العديد من الإشكالات: **أولها** عدم صدق الحكومات والشركات النفطية، أكانت وطنية أو ذات صبغة تجارية دولية، في الأرقام التي تدّعيها لاحتياطها النفطي. **السبب الآخر** عدم توفر معلومات جيولوجية وجيوفيزيائية وجيوكيميائية دقيقة وشاملة لمختلف دول العالم، مثيلة لما كان متوفراً لهابرت فيما يخص الولايات المتحدة. وهناك **سبب ثالث** هو

البدء بالاستشكاف والتنقيب في مياه أعمق فأعمق تتجاوز ما يدعى عرفاً بالجرف القارّي(*)، لذا فإن وضع تاريخ محدد أمر غير ممكن.

ورغم أن الصورة العامة حول توفر المصادر الهيدروكاربونية للطاقة ليست بتلك القتامة، كما سأبيّن لاحقاً، إلا أن المطلوب قبل كل شيء هو جهد عالمي لتحديد استهلاك الطاقة وبخاصة من المصادر الهيدروكاربونية، وذلك بسبب محدوديتها، وربما يكون السبب الأهم للتحديد هو المترتبات الناجمة عن الاستهلاك بهذا المستوى وما ينتج عنه من تلوث فق إمكانيات التصريف الطبيعية لكوكب الأرض. وربما سيكون لمثل هذا التحديد أثر على مستوى المعيشة في الدول الصناعية، وسيكون المساس بهذا المستوى الحياتي مثل المساس بالكأس المقدسة، لذا فإن هذه مهمة حساسة وتتطلب تقبلاً سياسياً ووعياً من الجماهير. وهناك إضافة إلى المجتمعات الصناعية قديمةِ العهد، الدولُ حديثة التصنيع، كالصين والهند وبقية دول شرق آسيا والبرازيل . . . وغيرها، وهذه كلها ومجتمعاتها تتطلع إلى مستوى حياتي أفضل، وإلى أن تتمتع بثروتها الجديدة، وهذا ما سيضيف أعباء جديدة على مصادر الطاقة ويفاقم المترتبات الناجمة عن التوسع في استهلاك الطاقة (في حال توفرها).

ولحين إيجاد الحلول لهذه المشاكل، سيعيش سكان كوكب الأرض في قلق متزايد. إن هذه المشاكل، إذا ما توفرت المشيئة، ليست بدون حل، لكن الأنانية هي صفة مميزة ـ مع الأسف ـ لأفراد الجنس البشري، وتظهر بصورة مجسمة وموسعة على مستوى المجتمعات والدول، ولا تتيح تبني أي حل (في الوقت الراهن على

(*) إذ إن حقل توبي (Tupi) البرازيلي العملاق على سبيل المثال يقع على عمق يربو على 2100 متر في المحيط الأطلسي.

الأقل) ولحين تفاقم الأزمة إلى مستويات أخطر. إن لنا في التوقيع الأولي للولايات المتحدة على بروتوكول كيوتو سنة 1997، ثم امتناعها عن التصديق عليه بعد استلام جورج بوش والحزب الجمهوري الحكم سنة 2001، مثال واضح على ذلك، علماً أن بروتوكول كيوتو كان هدفه وضع حدود لانبعاث غاز ثاني أوكسيد الكاربون الناجم عن حرق الوقود الأحفوري (وبخاصة الفحم، إنما يشمل أيضاً المنتجات البترولية)، الذي يهدد بمفاقمة الأسباب الكامنة وراء ما بات يعرف بالدفيئة العالمية وما بدأ ينجم عنها من ذوبان لنكتل الجليدية القطبية وتغيرات مناخية لا تبشر بالخير.

وإذا ما عدنا إلى موضوع هذا الكتاب، الذي نشره مؤلفة سنة 2005 حول محدودية مصادر النفط عالمياً ووصول إنتاج النفط ذروته في يوم الشكر سنة 2005، فمنذ ذلك الحين نما الإنتاج بصورة كبيرة في مناطق واعدة لم تخضع لاستشكاف واسع فيما سبق، فبعض الأقطار الأفريقية، كأنغولا وتشاد والسودان، بدأ إنتاجها يتزايد بصورة مطردة، وقد يشمل ذلك عدداً أكبر من الدول الأفريقية. كذلك أعلنت البرازيل عن اكتشاف بحري لحقل ذي سعة تضعه في مصاف الحقول العملاقة الفائقة (Supergaint Fields). وأخيراً هناك منطقة باكن في أميركا ذاتها (وقد ذكرناها سابقاً)، التي تقول بعض المصادر إن خزينها من النفط قد يتجاوز خزين المملكة العربية السعودية. كل هذا، معناه أن مجال التوسع في إنتاج النفط لا يزال مفتوحاً، وأن أي تناقص في الإنتاج خلال سنة 2008 قد يكون بسبب تقلص الطلب إثر الانكماش المالي العالمي، لا بسبب عدم توفر الموارد النفطية.

وإذا ما تركنا النفط جانباً لنبحث في البدائل، فهناك (بلّورات الغاز الطبيعي المائية) وهي بلورات يتطرق الكتاب إليها إنما لا

يعطيها الأهمية التي أعتقد أنها تستحقها. ويشاركني العديدون ممن يتناولون موضوع مصادر الطاقة هذا الاعتقاد، فهذه البلورات متوفرة بكميات هائلة في قاع المحيطات، وكذلك على اليابسة، وهي مصدر للغاز اكتشف قبل بضعة عقود وحسب. ورغم الاختلاف في تقدير كمياتها، إلا أنها كميات هائلة بأي احتساب. يقول المؤلف إن شركات النفط الكبرى لم تفلح رغم مضي بضعة عقود على اكتشافها في الاستفادة منها واستغلالها، وهذا يتطلب بالطبع تصميم طريقة معالجة ناجحة تكنولوجياً وذات جدوى اقتصادية، لاستخلاص الغاز من هذه البلورات. ولا أعتقد أن عبقرية الإنسان قاصرة عن مثل هذا الإنجاز، والحاجة كما يقال أُمّ الاختراع.

إنه ليس من الصدف أن العالم قد طور خلال السنين القليلة المنصرمة طريقة ذات جدوى تكنولوجية واقتصادية لتحويل الغاز إلى سوائل نفطية، في ما أصبح يعرف باسم (Gas - To - Liquids)، أو (GTL) اختصاراً. يمكن بهذه التقنية تحويل غاز الميثان ـ أي الغاز الطبيعي ـ إلى أي نوع من المشتقات النفطية تقريباً، وكذلك إلى زيوت تزليق، وكلها ذات مواصفات تفوق مثيلاتها المشتقة من تقطير النفط في معامل التكرير. وقد طورت هذه التقنية في الأصل لاستغلال الغاز المتوفر في مواقع جغرافية نائية عن أسواقه وكرديف لطريقة نقله كغاز مسيل بالتثليج. ومما تجدر الإشارة إليه أن هناك سعياً دؤوباً لتطوير طرق معالجة جديدة أبسط تقنياً وأرخص من حيث الكلفة لتحقيق نفس النتيجة مقارنة بالطريقة المستخدمة الآن، وذلك مما سيعزز إمكانية استغلال الغاز لتحويله إلى مواد يشتد عليها الطلب.

لذا، فإن النجاح في استخراج الغاز من بلوراته المبتذلة وتحويله إلى سوائل هيدروكاربونية بواسطة تقنية (GTL) الحالية، أو التي

يُتوقع تطويرها عما قريب، يعطيان الجنس البشري الفرصة التي يبتغيها بعد نضوب مصادر النفط العادية، إلى الحين الذي سينجح فيه أحفادنا في تذليل الطاقة النووية الاندماجية غير الملوثة، أو في الحصول على الهيدروجين من الماء بطريقة سهلة وآمنة، لكي يتم التحول إلى ما يدعوه الإعلام اليوم (اقتصاد الهيدروجين) الذي نحصل فيه على الطاقة من الهيدروجين الذي يحترق أثناء توليده للطاقة ليتحول إلى صيغته المائية مكرراً دورته في الطبيعة.

يبقى القول إن سعي الإنسان لامتلاك مصادر ووسائل الطاقة هو شغله الشاغل، أكان على المستوى الفردي أو على المستوى الدولي، وهو سعي كان له أثر لا يستهان به في تحديد سياسات الدول وعلى النزاعات الدولية خلال القرن الماضي. ويعتقد الكثيرون أن حصول انفراج في قضية إمدادات الطاقة في الولايات المتحدة، أكان ذلك باكتشاف حقول عملاقة جديدة، مثل حقل باكن أو من خلال اكتشاف تقنية معالجة بلورات الغاز المائية المبتذلة، سيغير من سلوكية الولايات المتحدة، وهذا معناه تغير شامل نحو الانفراج في العلاقات الدولية.

صباح صدّيق الدملوجي

مقدمة الطبعة ورقيّة الغلاف

يستحق هذا الكتاب ـ **ما بعد النفط** ـ مع إصدار هذه الطبعة الشعبية المحدثة عنوانه، إذ إن إنتاج النفط حسب تقديري تجاوز ذروته يوم 16 كانون أول/ ديسمبر 2005، والمنظر الآن من ذروة هابرت مخيف فعلاً.

وليس يوم 16 كانون أول/ ديسمبر بتلك الدقة، فباستطاعتي أن أضع حجة بديلة جيدة للسابع عشر من كانون أول/ ديسمبر. وقد حُدِّث الخط البياني على صفحة ليشمل الحقول النفطية الجديدة التي اكتشفت خلال سنتي 2004 و2005، لكن تقدير كمية النفط الكلية في الخط البياني الجديد لم تتغير، وهي 2,013 تريليون برميل. وتتطلب معادلة هابرت على صفحة 89 أن نصل الى ذروة الإنتاج عندما نكون قد أنتجنا نصف النفط. إن احتساب الكمية التراكمية لإنتاج النفط من بداياته يعطينا 0,9812 تريليون برميل في نهاية سنة 2004 و1,00748 تريليون في نهاية سنة 2005. ونصف 2,013 هو 1,0065. ويعطينا استقراء بسيط تاريخ 16 كانون أول/ ديسمبر كتاريخ للذروة. والطريقة الأخرى للتدقيق هي بواسطة الخط البياني على صفحة 96، حيث إن النقطة التي تمثل سنة 2005 تقاطعت مع علامة (+) الوسطية.

وقد تركت التعليق في نقطة الإشارة الأولى في صفحة 99 على ما كان عليه في الأصل، لأن مدلوله دقيق. شكراً لكم.

وقد نشر ماثيو سيمونز (Matthew Simmons) سنة 2005 كتاباً مهماً بعنوان (*Twilight in the Desert*)، حول المشاكل التي تواجهها المملكة العربية السعودية، إذ يقرر سيمونز، اعتماداً على قراءة دقيقة لنحو مائتي ورقة تقنية نشرها مهندسو أرامكو السعودية، أن العربية السعودية تكافح للإبقاء على كمية إنتاجها الحالية، والنسبة المئوية للماء المنتج مع النفط في حقل الغوار العملاق ذات أهمية خاصة، فنسبة الماء عندما أرسل سيمونز كتابه للطبع تراوحت بين 25 و 30 بالمائة، لكن التقارير الواردة على الإنترنت[1] تشير إلى أن نسبة الماء بلغت 55٪. ابق معنا.

ورغم أني أبديت بعض التحفظات في صفحة (141) حول التقديرات الكبيرة لكمية الميثان المحتبسة بشكل بلورات الغاز المائية، إلا أن الأنباء مؤخراً كانت حتى أسوأ مما تصورت، فقد أمضى مشغّلو أحد الآبار التجريبية في شمال ألاسكا على وجه الخصوص سنتين في الموقع، وأفادوا أنه: «للأسف لم يتمّ العثور على أي بلورات غاز مائية في هذه البئر»[2]، وكانت كلفة العمل كله أكثر من 20 مليون دولار.

إن إدراك مأزق الطاقة الذي نواجهه جميعنا قد تسرب ببطء إلى الحكومة الاتحادية، فقد كان ألان غرينسبان (Alan Greenspan) يخبرنا سنة 2004 أن سوق الغاز الطبيعي في أميركا الشمالية قد بلغت

---

(1) انظر: http://home.entouch.net/dmd/ghawar.htm.

(2) انظر: http://www.maurertechnology.com/Engr/RDprojects/Hydrates/FinalReport(1) - Main.pdf.

حدها الأقصى، وكان روزكو بارتليت (Roscoe Bartlett) عضو مجلس النواب عن ولاية ماريلاند يتحدث في خطابه سنة 2005 عن مشكلة الذروة في إنتاج النفط، وكان الرئيس بوش يقول لنا سنة 2006 إننا قد «أدمنا على النفط». وسيراً على هذا ربما نكسب كل حكومة الولايات المتحدة إلى جانبنا مع نهاية القرن.

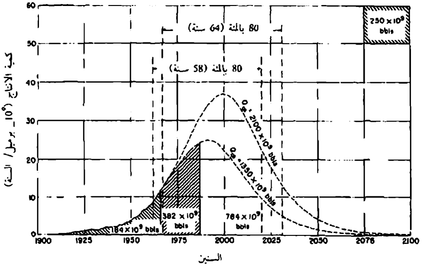
مقدمة الكتاب

إننا نواجه معضلة لم يسبق لها مثيل، فقد توقف النمو في إنتاج النفط في العالم وسيبدأ الانخفاض في الإنتاج قريباً. وسوف لن يلبي الإنتاج الجيولوجي لمورد حيوي المتطلبات وذلك للمرة الأولى منذ الثورة الصناعية.

وقد كان هناك العديد من التحذيرات، فقد نشر م. كينغ هابرت (M. King Hubbert)، وهو جيولوجي أميركي، سنة 1969 توقعاته عن إنتاج النفط المستقبلي على المستوى العالمي[1]. وتوقع هابرت أن إنتاج النفط السنوي سيكون حسب خط بياني ناقوسي الشكل (Bell -Shaped)، وهو المنحنى الذي عرف في ما بعد باسم «ذروة هابرت». وقد حدد التقدير الأكثر تفاؤلاً من بين تقديريه في سنة 1969 مجمل ثروة العالم النفطية بـ 2,1 تريليون برميل، وحدد سنة 2000 على أنها سنة ذروة الإنتاج. أما أحسن تقديراتي الحالية (وهي

(1) انـظـر: M. King Hubbert, «Energy Resources,» in: *Resources and Man*, a Study and Recommendations by the Committee on Resources and Man, of the Division of Earth Sciences, National Academy of Sciences, National Research Council, with the Cooperation of the Division of Biology and Agriculture (San Francisco: W. H. Freeman, 1969), p. 196.

مفصّلة في نهاية الفصل الثالث)، فتضع مجمل كمية النفط بحدود 2,013 تريليون برميل وتضع ذروة الإنتاج سنة 2005[2]. وأي من كان مصيباً في تقديره، أو حتى إذا ما كنا كلانا مخطئين، فإننا لسنا موغلين جداً في الخطأ. وحيثما كانت الذروة فإن المنظور ليس مريحاً.



جرى نشر هذا الشكل للمنحنى ذي الشكل الناقوسي المعروف باسم ذروة هابرت من قِبَل م. كينغ هابرت سنة 1969. ويتوقع الخيار الأكثر تفاؤلاً من البديلين أن ذروة الإنتاج ستحدث سنة 2000. وقد قدم هابرت هذا التوقع باستخدام نموذج مبكر أولي لطريقته تطلب بعض التخمينات الذكية لكامل كمية النفط المتوفرة. ومع تقدم التنقيب والإنتاج لم يعد هابرت بحاجة لتخمينات ذكية. ولا يزال المنتقدون يقولون حتى يومنا هذا، وبصورة مخطوءة، إن كافة التقديرات من النوع الذي قدمه هابرت تحتاج تقديرات مسبقة مستقلة لكمية النفط الكلية المتوفرة. انظر: M. King Hubbert, «Energy Resources,» in: *Resources and Man*, a Study and Recommendations by the Committee on Resources and Man, of the Division of Earth Sciences, National Academy of Sciences, National Research Council, with the Cooperation of the Division of Biology and Agriculture (San Francisco: W. H. Freeman, 1969), p. 196.

---

(2) انظر: Kenneth S. Deffeyes, *Hubbert's Peak: The Impending World Oil Shortage* (Princeton: Princeton University Press, 2001).

وقد بدأ اهتمامي بمسألة الموارد النفطية سنة 1958، عندما بدأت العمل في مختبرات شركة شل للبحوث في هيوستن. كان هابرت يتمتع بسمعة نجم متألق في مختبرات شل، للعديد من الأسباب، إضافة إلى توقعاته حول النفط. وقد سرني العمل في المختبر، كما تمتعت بمعرفة هبرت.

كان من الواضح سنة 1963 أن صناعة النفط ستتغير بصورة هائلة عند حلول سنة 2000، وهو التاريخ الذي يفترض أني سأتقاعد فيه. وقد كان التحليل الذي أجريته للأرقام التي طرحها هابرت سبباً في تركي لصناعة النفط بصورة مبتسرة أو سابقة لأوانها. ولم يكن تركي العمل هناك أمراً سهلاً من الناحية العاطفية، فقد ترعرعت في منطقة نفطية، وكان والدي مهندس نفط من الرعيل الأول، وكنت قد ولدت في أوكلاهوما ولي أصول من قبيلة جيكاساو (الهندية الحمراء)، وأستطيع تذكر الجفاف الفاجع الذي أصاب السهول الأميركية. قررت عندما بلغت العاشرة من عمري أن أصبح جيولوجياً مختصاً بالنفط، وعندما كنت في المدرسة الثانوية حصلت على المساعدة من مصدرين، إذ إن كلاً من جاك فرانشو (Jack Franshwe) وبول والتون (Paul Walton) لم يوفّر جهداً في تعليمي علم المعادن (Mineralogy). كانت سني دراستي الجامعية الأولية (في كلية كولورادو للمعادن) والتخصصية (في برنستون) قد تركزت على الأساليب المفيدة في التنقيب عن النفط وإنتاجه، وكنت في عطل صيفية متوالية قد مارست مهناً علمتني الجانب الوسخ من عالم النفط. كان لدي لبعض الوقت ملصق على مِصَدّ سيارتي مكتوب فيه «من رعاع الحقول النفطية وفخور بذلك».

وبعدما تركت شركة شل قمت ولمدة سنتين بالتدريس في جامعتي ولايتي مينيسوتا وأوريغون، ثم التحقت بالهيئة التدريسية

لبرنستون، وكان التدريس والبحث مجزيين، وكان باستطاعتي أن أستمر بالعمل الاستشاري جزئياً في النفط والتعدين. أما البرنامج الذي كنت أقدمه في الجامعة بعنوان «علم الرسوبيات» (Sedimentology)، فكان تمويهاً لبرنامج في جيولوجيا النفط.

هذا الكتاب يعنى بأنواع الوقود التي نستحصلها من الأرض. وسيلي ذلك عدد من الأسئلة عن السياسة العامة بالطبع، لكن خبرتي مع ذلك تنتهي حيث تتوقف الجيولوجيا، فآي آراء لدي حول الحكمة في زيادة الضرائب على البنزين أو زيادة الضرائب على النفط المستورد إلى الولايات المتحدة ليس لها أي قيمة تزيد عن رأي أي مواطن أميركي عادي. وسأحاول في هذا الكتاب أن أوضح منافع ومساوئ أنواع الوقود الأحفوري المختلفة(*). أما تحديد السياسة الواجب اتباعها فهي مهمة لنا جميعاً كمواطنين.

والفصلان الأول والثاني ليسا إلا إفادات موجزة عن مسألة سد الاحتياج للنفط. أما الفصل الثالث فهو نتيجة لمصادفة سعيدة: إذ استطعت إيجاد بديل لتحليلات هابرت الرياضية المعقدة، فتحليلات هابرت تحتاج إلى صفحات من المعادلات التفاضلية للذهاب من (أ) إلى (ب).

أما الذهاب من (ب) إلى (أ) فيستحصل نفس النتائج، لكنه لا يحتاج إلا لثلاث أسطر من الجبر للمرحلة الثانوية. وتغطي الفصول من الرابع وحتى الثامن الغاز الطبيعي والفحم والرمال القيرية ونفط السجّيل واليوارنيوم. أما الفصل التاسع فهو شاذ عن البقية، فالهيدروجين ليس نوعاً من الوقود الذي يستخرج من الأرض، لكن

(*) تُعتمد تسمية الوقود الأحفوري في اللغة العربية لكافة أنواع الوقود المستخرجة من الأرض، لكن ذلك يقتصر على الهيدروكاربونات ولا يشمل اليورانيوم.

وجود ذلك القدر من المعلومات المخطوءة حوله أجبرني على إعطاء بعض التوضيحات عنه. والفصل العاشر هو مقالة عن رؤية العالم من خلال عيون جيولوجي، وهو ما يدعوه ويليام سافير (William Safire) «مصر الإبهام». جاء تخفيض كمية احتياطيات النفط التي تمتلكها شركة شل سنة 2004 بمثابة صفعة مؤلمة، وكنا نحن ـ ممن عملوا مع شل ـ مندهشين بوجه خاص: فشل كانت شديدة الحرص على كل شيء. ولا أملك أي مصادر خاصة للمعلومات من داخل شركات النفط الرئيسية، لكني أحاول في الغالب أن أقيّم ما يفعلون وليس ما يقولون، فقد اشتكت افتتاحية مجلة (*Business Week*) في عددها الصادر في 21 حزيران/ يونيو 2004 حول عدم انعكاس الزيادة البالغة 30٪ في أسعار النفط على ميزانيات الاستكشاف للشركات النفطية إلا بصورة ضئيلة.

وتعمل مصافي الولايات المتحدة، وبطريقة مشابهة، عند حدودها القصوى، دون أن يجري بناء أي مصفاة جديدة منذ سنة 1976. وناقلات النفط البحرية محجوزة بالكامل، لكن الناقلات القديمة تحال إلى الترحيل بوتيرة أسرع من بناء بدائل جديدة. ويبدو بدل ذلك أن الصناعة النفطية تختزن النقد وتعيد شراء أسهمها وتوزع الأرباح على المساهمين، فما الذي يجري؟ لماذا لا تشجع الأسعار العالية والطلب المتزايد على الاستثمار؟ افترض ولو للحظة أن فرضية هذا الكتاب صحيحة: أي أننا قد اكتشفنا الجزء الأعظم من النفط. وعمليات الحفر بحثاً عن القليل المتبقي لا تحمل معها ربحاً أو لذةً، فهل على شركات النفط الكبرى أن تحفر سلسلة من الثقوب الجافة لكي تُسِرَّ محرري (*Business Week*)؟ فإذا ما كان إنتاج النفط العالمي، كما قيل، على وشك الانخفاض، فلا داعيَ إذاً إلى إضافة مصافٍ جديدة، أو زيادة حجم أسطول الناقلات.

ولا تجاهر شركات النفط الكبرى في العلن بأن لعبة النفط انتهت، فلو توفرت فرص مغرية لرأيت الشركات تشق الطريق بمخالبها، الواحدة تلو الأخرى للحصول على حقوق الحفر. وهناك بعض أعمال الحفر المهمة التي يجب القيام بها في بعض الأقطار. وحتى إذا ما قامت شركة نفطية بتوقيع عقد مع شركة النفط الوطنية في ذلك القطر، أو مع الحكومة ذاتها، فإن العقود غير قابلة للتطبيق في العديد من الأقطار. احفر بئراً جافة ولن يحدث أي شيء. اعثر على اكتشاف مهم وستجد فجأة أن العقد سيعاد النظر فيه.

وقد كان هناك اهتمام ملحوظ في دوائر التمويل حول مشكلة سد الاحتياجات النفطية خلال السنين الأربع المنصرمة، وقام نفر من المهتمين بصيانة الموارد الطبيعية بإيلاء القضية اهتمامهم أيضاً، فكيف يمكنك تقليل مستوى ثاني أوكسيد الكاربون في الجو؟ هل تنتظر نضوب النفط؟ ولم يُعِر السياسيون والجمهور بصورة عامة الموضوع إلا القليل من الاهتمام، وإليك جزء من السبب: فبعض المراقبين المهنيين في عالم النفط يقولون إن إنتاج النفط العالمي سيستمر في الازدياد لغاية سنة 2030. ويشعر أي منشور يتوخى «العدالة» أنه مجبر على عرض وجهتي النظر للقصة، فهل يعني الأمر عند اختلاف المهنيين أننا نفتقد أى معرفة حقيقية؟ وهل من الأسلم التغاضي عن المشكلة لحين اتفاق خبراء المهنة؟

وإليك إجابتي: إن الامتناع عن أي عمل اليوم هو ببساطة المراهنة على كون هابرت مخطئ. لقد كان توقع هابرت سنة 1956 بأن ذروة إنتاج النفط في الولايات المتحدة ستكون في بداية السبعينيات، صحيحاً بصورة أساسية، أما توقع هابرت في سنة 1969 بأن إنتاج النفط في العالم سيبلغ ذروته سنة 2000، فتبدو صحته الآن (والتفاصيل في الفصل الثالث). كان علينا قبل خمسة عشر عاماً أن نبدأ بالاستثمار بقوة في استراتيجيات الطاقة البديلة. وقد فقدنا تلك

الفرصة الآن. ولا يتوفر أي وقت لإجراء البحوث الأكاديمية. كما لا يتوفر وقت للمهندسين لتطوير مكائن جديدة، لذا فعلينا أن نواجه السنين الخمس القادمة بذات تفاصيل المعدّات المنتجة الآن ولن يكون الأمر سهلاً.

شكر وتقدير

أود أن أقدم شكري للملاحظات الوافية التي أبداها الذوات التالية أسماؤهم على المسوّدة الأولى: بيل بونيني (Bill Bonini)، ولاري كثليس (Larry Cathles)، وروبرت ديفيس (Robert Deffeys)، وسوزي ديفيس (Suzy Deffeys)، وسارة دومينغو (Sara Domingo)، وإيمانويل ليشتينشتاين (Imanuel Lichtenstein)، وبيتر لو (Peter Lu)، وإلدردج مورس (Eldridge Moores)، وجيسون فيبس مورغان (Jason Phipps Morgan)، ودبليو. جيسون مورغان (W. Jason Morgan). كما أن كل من جو ويزنوفسكي (Joe Wisnovsky)، وتوماس لوبيان (Thomas Le Bien) قاما بقراءة دقيقة للمسوَّدات اللاحقة. ورغم ذلك فإني مسؤول عن أي أخطاء. (لأنني لم أتقيد بآرائهم في كافة المواقف).

توضيح

إن معظم المادة في هذا الكتاب ذات علاقة بالمستقبل الاقتصادي القومي (أي للولايات المتحدة) وللعالم، لكن هدف الكتاب ليس أن يكون مرشداً للاستثمار، فأنا لا أمتلك أي خبرة في «علم الاقتصاد الكئيب»، فمعلوماتي الوحيدة في الاقتصاد تعود إلى موضوع مفرد في الاقتصاد في دراستي الجامعية الأولية قبل اثنين وخمسين عاماً. ولكي أقولها بصورة صريحة، فإن أحسن وصف لسجل استثماراتي هو أنه متفاوت.

ما بعد النفط

الفصل الأول

لماذا النظر إلى ما بعد النفط؟

إن النفط الذي تزودنا به الأرض ليس بالمادة التي لا تنضب، فإنتاج النفط الخام في العالم سيصل يوماً ما إلى ذروته وسيبدأ بالتناقص، وسنصل إلى ذروة الإنتاج حسب رأيي في نهاية سنة 2005، أو في الأشهر الأولى من سنة 2006، وأرشح يوم الشكر الموافق الرابع من تشرين الثاني/ نوفمبر 2005 كيوم ذروة الإنتاج النفطي في العالم. وهناك سبب لاختيار يوم الشكر، فبإمكاننا أخذ وقفة قصيرة لنقدم الشكر للسنوات الممتدة من 1901 وحتى 2005 حين دعم الإنتاج الوفير للنفط والغاز الطبيعي تغييرات هائلة في مجتمعنا. وعلينا في الوقت ذاته أن نواجه الواقع: فإنتاج النفط في العالم سيتقلص ببطء في البداية ثم ستزداد سرعته.

كانت توقعاتي المتعلقة بنهاية سنة 2005 تستند إلى معدلات الإنتاج السنوية الممهّدة، وعندما نمر على قمة المعدل الممهّد تبرز السنين المفردة أو تهبط مثل سنين النبيذ المعتق. وعند كتابة هذه السطور (في منتصف سنة 2004) كانت سنة 2003 السنة التي كان فيها أكبر إنتاج للنفط[1]. وعلى أي حال، فإن إنتاج سنة 2003 لم يتجاوز إنتاج سنة 1998

(1) تنشر مجلة *Oil and Gas Journal* أرقام الإنتاج والاحتياطي في آخر عدد أسبوعي ـ

إلا بمقدار 3٪ فقط. وهذا ليس 3٪ في السنة، بل إنه بالأحرى 0,6٪ في السنة فقط. وقد توقف النمو في إنتاج النفط العالمي الآن، والخطوة التالية ستكون الهبوط. لذا، فإن المهمة السهلة انتهت. إن توقعي لذروة الإنتاج النفطي العالمي يستند إلى الأسلوب الذي استخدمه م. كينغ هابرت سنة 1956 ليتوقع ذروة إنتاج الولايات المتحدة النفطي في سنة 1970[(2)] (أسلوب هابرت مشروح بالتفصيل في الفصل الثالث). كان عدد من جيولوجيي النفط قد قاموا حتى قبل أن أنشر كتابي *(Hubbert's Peak: The Impending World Oil Shortage)*، بنشر استنتاجات مشابهة[(3)]. وكان هابرت قد نشر تنبؤاته عن إنتاج النفط العالمي سنة 1969، وقد حدد السيناريو الأكثر تفاؤلاً الذي قدمه سنة 2000 كسنة الذروة. أما إدارة المسح الجيولوجي في الولايات المتحدة، فقد قامت من ناحية أخرى بنشر تقديرات تفاؤلية بدرجة هائلة للإمكانيات النفطية للولايات المتحدة وللعالم[(4)]. وقد توقع محللون آخرون، مستخدمين نتائج إدارة المسح الجيولوجي، أن الذروة في إنتاج النفط لن تحدث حتى سنة 2036[(5)].

من كل سنة. ورغم كون مجلة *World Oil* مصدراً بديلاً للمعلومات، إلا أني، وللاستمرار مع المؤلفين السابقين، قمت باستخدام الأرقام التي تنشرها (O&G J).

(2) انظر: M. King Hubbert, «Nuclear Energy and the Fossil Fuels,» *American Petroleum Institute Drilling and Production Practice Proceedings* (Spring 1956), pp. 5-75.

(3) انظر: Craig Hatfield, «Oil Back on the Global Agenda,» *Nature*, vol. 387 (1997), p. 121, R. A. Kerr, «The Next Oil Crisis Looms large, and perhaps close,» *Science*, vol, 281 (1998), pp. 1128-1131, and Colin Campbell and Jean Laherere, «The End of Cheap Oil,» *Scientific American*, vol. 278 (1998), pp. 78-83.

(4) انظر: USGS World Energy Assessment Team, *U.S. Geological Survey World Petroleum Assessment 2000: Description and Results* (Washington D. C.: U. S. Geological Survey, 2000).

(5) انظر على سبيل المثال: H. W. Parker, «Demand, Supply will Determine when World Oil Output Peaks,» *Oil and Gas Journal* (25 February 2002), pp. 40-48.

تقديم الشكر

لقد أحدث النفط والغاز الطبيعي تحوّلات في مجتمعنا ما بين سنتي 1901 و2005، فقد غيّرت بئر سبندل توب (Spindle top) قرب مدينة بومونت (Beaumont) في تكساس سنة 1901 أسس الصناعة النفطية.



كان م. كينغ هابرت معروفاً بصورة جيدة بين الجيولوجيين، بسبب عدد من أفكاره الابتكارية التي كان يدعمها بالتحليلات الرياضية. وبعدما صدقت توقعاته حول توقيت ذروة الإنتاج النفطي في الولايات المتحدة، اعتبره المحافظون على البيئة بطلاً شعبياً. (مقتبسة من: جورج تيمس (George Tames) في: *New York Times*).

كان ذلك فتحاً لمنطقة ساحل خليج المكسيك ذات الإمكانية الإنتاجية الهائلة، ما دفع بإنتاج الولايات المتحدة ليصبح الأول عالمياً، متجاوزاً روسيا، كما أنه أدخل جهاز الحفر الدوراني الذي لا يزال السائد في الحقول النفطية. إضافة، فإن تدفق النفط أو الغاز في البئر أصبح موضع تحكم. والنقطة الأخيرة هي أن التحكم في التدفق تحت سطح الأرض أزال «البئر المنفلتة» (gusher) من المنظور الروتيني للعمل النفطي، عدا حالات حوادث الفشل.

كان والديّ قد ولدا سنة 1903 و1904 ونشا في موقعين مختلفين من ولاية أوكلاهوما. وادعت والدتي أن السيارة كانت عامل التغيير الأهم الذي أدخل الحركة الاجتماعية مثلما أدخل الحركة الشخصية، فقبل السيارة لم يكن هناك سوى سفرات أسبوعية في عربة تجرها الخيل إلى أقرب بلدة صغيرة لبيع منتوج المزرعة ولشراء التجهيزات. وقد ساعدت سيارة فورد موديل T والدي على الوصول إلى كلية أوكلاهوما للزراعة والميكانيك التي أعيدت تسميتها لتصبح جامعة ولاية أوكلاهوما. وادعت إحدى عماتي أن الحافز الأكبر للدراسة الجامعية كان الهروب من تلك المزارع.

وكانت السيارة وصناعة النفط مصنوعتين كلاهما للآخر، فمنذ سنة 1859 وحتى سنة 1908 كان المنتوج النفطي الرئيسي هو الكيروسين، الذي كان يستخدم للإنارة. بعد ذلك، أصبحت السيارات والشاحنات الأسواقَ سريعة التوسع، وجرى تحسين مصافي تكرير النفط لتحول جزءاً أكبر من النفط الخام إلى بنزين، وأصبح التنقيب عن النفط واستخراجه صناعة عالمية.

وشهدت سنة 1903 أول طيران للأخوين رايت، وكان محتوى الطاقة العالي لوحدة الوزن من البنزين ذا أهمية في الطائرات أكبر من أهميته في السيارات. وأصبح البنزين ذو النوعية الممتازة للطائرات أحد المنتوجات المربحة، رغم أن الطيران مثّل سوقاً أصغر بكثير من سوق السيارات. ومع إدخال مكائن الطائرات النفاثة سنة 1945، اكتسب أحد المنتجات الشبيهة بالكيروسين، المسمى بـ JP-4(*)،

(*) يدعى هذا المنتوج خارج الولايات المتحدة كيروسين توربينات الطائرات، أو (Aviation Turbine Kerosene) أو (ATK) للاختصار، وهو كيروسين ذو ضغط بخاري عال ومواصفات خاصة.

أهمية خاصة، وأصبحت قابلية الحركة شيئاً عالمياً، فمن الممكن اليوم أن تسافر من الباب إلى الباب في عنوان بأي شارع في أية مدينة في العالم إلى مدينة أخرى في أقل من أربع وعشرين ساعة. ولا يقتصر ذلك على البشر فقط: فالبريد وأجزاء الحواسيب وثمر المانكو والإسباراغوس كلها تنقل جواً.

تم في الوقت ذاته تحويل الزراعة في الريف، فاستبدلت الأحصنة بالجرارات الميكانيكية، وجرى تسويق المنتوج إلى أسواق أبعد مدى، وأصبحت الأسمدة المعدنية واسعة الاستخدام، وحسنت الثورة الخضراء في الستينيات نوعية البذور والمبيدات الحشرية والأسمدة المعدنية، لتجعل من المجاعة شيئاً من الماضي. ورغم أن هذه الثورة لم تكن «عضوية»، إلا أنها قهرت الموت من الجوع. ولكي تتكون لدينا صورة عن أهمية النفط، نقول إن 80٪ من كُلَف إنتاج الذرة في ولاية آيوا تمثل بصورة مباشرة أو غير مباشرة كلفة الوقود.

وبرزت صناعة جديدة متكاملة لصنع الأشياء المشتقة من النفط: وهي صناعة البتروكيميائيات. وهناك مجموعة مدهشة من المواد التي تصنع من النفط والغاز الطبيعي تشمل اللدائن والألياف النسيجية والمذيبات ومبيدات الحشرات ومواد الطلاء. وتخميني هو أن البتروكيميائيات ستكون آخر وأحسن استخدام للنفط عندما يصبح مادة شحيحة، فاستخدام النفط ككتل بناء معدّة سلفاً للكيمياويات العضوية أفضل من حرقه كوقود. وعندما يعرض عليَّ كيس من اللدائن لا أحتاج إليه في محل بقالة أقول لهم «لا شكراً، أنقذوا بئر نفط».

كنت قد زرت إنجلترا سنة 1967، ثم زرتها ثانية سنة 1985، ودهشت للتغييرات التي حدثت خلال الفترة المنقضية بين الزيارتين، فالدور القديمة سيئة التدفئة أصبحت تدفأ بالغاز المكتشف حديثاً في

بحر الشمال، وقد استبدل شعور يقرب من اليأس بنفحة من الازدهار. والثروة المتأتية من النفط والغاز موزعة بصورة غير منتظمة خلال العالم كله، أكان ذلك بين الأقطار أو بين الأفراد. وتساهم الجيولوجيا والسياسة في خلق هذه الحالة، فحقول النفط الكبرى توجد حيثما يكون عدد من الأوضاع الجيولوجية المطلوبة «مضبوطاً تماماً». أما تقسيمنا المتكرر للعالم إلى أقطار مستقلة أصغر فأصغر، فقد ساهم مع نجاح أنظمة الملكية الخاصة في تركيز جزء كبير من الثروة النفطية في أيد قليلة.

مثال ذلك: خلال بقائي في جامعة كامبردج سنة 1985 احتجت إلى كتاب من مكتبتهم الرئيسية. وما أن دخلت البناية حتى تملكني شعور غريب مفاده أني لم أعد في إنجلترا، فمكتبة جامعة كامبردج بدت أميركية. ووجدت عرضاً في صالة المدخل يفسر سبب ذلك، فقد جرى بناء المكتبة خلال فترة الكساد الكبير بمنحه من روكفيلر. إنها أموال النفط.

ولا أدعي أن النفط والغاز كانا مسؤولين عن توليد كافة حسنات القرن العشرين، فالحواسيب وأساليب الاتصالات نجحت جزئياً بسبب تناقص كميات الطاقة المطلوبة لتشغيلها. أما السيليكون، فهو ثاني أكثر العناصر ابتذالاً في قشرة الأرض، لذا فإن الحصول عليه لم يكن مشكلة قط. لكن كان هناك بعض المساعدة من الصناعة النفطية، فبراءة الاختراع لرقاقة الدوائر المدمجة حصلت عليها شركتي تكساس إنسترومنتس وأنتل مشاركة، وكانت تكساس إنسترومنتس عندما اخترعت الرقاقة شركة خدمات نفطية تقوم بإجراء المسوحات الزلزالية (Seismic Surveys) في عملية البحث عن النفط[6].

(6) انظر: T. R. Reid, *The Chip* (New York: Random House, 2001), pp. 62-64.

ولكوني جيولوجياً، لديّ أسبابي الخاصة لأشكر النمو في صناعة النفط، فقد قمت شركات صناعة النفط الرئيسية بتأسيس مختبرات جيدة التجهيز تدار من قبل أناس جيدي التخصص. وكانت المعجزة بالنسبة لجيولوجي مثلي هي وجود فيزيائيين وكيميائيين وأخصائيي رياضيات من الدرجة الأولى على الملاك، ممن كانوا مستعدين ومتحمسين للتداول في القضايا الجيولوجية. وكان هناك ابتكاران تقنيان لهما أهمية، لأن كليهما أعطانا معلومات هادفة غير قابلة للتأويل:

- مستشعرات ترسل في أعماق البئر على نهاية كابلات كهربائية لقياس خواص الصخور، تعرف باسم سجلات الخط السلكي (wireline logs)، وكانت ترسل في كفة الآبار تقريباً، وهي مصدر مهم للمعلومات.

- موجات صوتية تولد على سطح الأرض وتعكسها من الطبقات الصخرية تحت الأرض فتعطينا مقاطع شبيهة بالصور التي تولدها الموجات فوق الصوتية (السونار) في الحقل الطبي.

وكان هناك أعمال مهمة إضافة إلى نتائج البحوث التي أجريت داخل الشركات النفطية نفذت من قبل المسوح الجيولوجية القومية وعلى مستوى الولايات. وقد ازدهرت أقسام الجيولوجيا في الكليات والجامعات، وذلك لأن شركات النفط كانت توظف الجيولوجيين. وقد تطورت أقسام جيولوجيا ممتازة في كليات مثل ماك ألستر (MacAlester)، وبرين ماور (Bryn Mawr)، وسميث، وبيليوت (Beloit)، ووليامز، إضافة إلى أقسام الجيولوجيا في الجامعات الرئيسية.

وقد دفعت هذه الجهود بجيولوجيا النفط إلى الموقع الأول من

الناحية الفكرية بين علوم الأرض، وصحب ذلك فهم أكثر تكاملاً لأي مورد جيولوجي.

ما الذي سيحدث بعد هذا؟

الخبر المهم هو: إن الإنتاج العالمي للنفط قد توقف نموه، ويتوقع أن يتناقص في سنة 2019 إلى 90٪ من الذروة التي بلغها إنتاجه. وليست هذه بالقصة الخبرية العادية. ويتوقع المراسلون والمحررون ومعظم القراء، أن أي قصة إخبارية ستتوارى عن الأنظار خلال أيام أو خلال أشهر في حالات خاصة. إن قصة ذروة الإنتاج النفطي لن تبقى عالقة وحسب، وذلك لأننا كلما تأقلمنا مع مستوى أقل للإنتاج، فإن ذلك الإنتاج سيتقلص ثانية. وقد يكون الإنتاج النفطي منتقصاً ولا يلبي حاجاتنا لكننا في حالة ممتازة قدر تعلق الأمر بالرصاص والزنك المتوفرين بأسعار رخيصة، إذا ما كنت بحاجة لهما.

ولا يتملكني أي شك في أن عبقرية الإنسان ستجد خلال فترة خمس عشرة سنة فقط مصادر ملائمة للطاقة ذات تسميات مبهجة، مثل «غير ملوثة»، و«مستدامة»، و«بديلة»، و«عضوية»، و«طبيعية». لكننا على مدى خمس سنين سنفتقد هذه الصفات المبهجة، إذ إن «الديزل» أو «الفحم» و«النووي» ليس لها ذلك الوقع الدافئ والمريح. وقد كان هناك الكثير من التحذيرات، فقد نُشرت بعض التوقعات منذ أكثر من ثلاثين سنة، ومع ذلك لم يتوفّر جهد قوي لتطوير اقتصاد جديد للطاقة؟ إن شعوري هو أن المحررين ومدراء الأخبار اعتقدوا أن مستمعيهم لن يبدوا أي اهتمام لقصة أخرى تشيع القلق لديهم. ولم يكن أي سياسي مستعداً لتبني برنامج سياسي يعتمد «الدم والعرق والدموع».

وهل أنا أعدكم هنا بالحرب والمجاعة والأوبئة والموت؟ إذا ما استطعنا الحفاظ على صناعة البتروكيميائيات متعافية فقد نتجنب الأوبئة. لكن الأخطار الثلاثة الأخرى تبقى تمثل إمكانيات حقيقية. ويجب أن يكون هناك نوع من تنظيم الندرة لحين يبدأ تطبيق نظام طاقة اقتصادي جديد. ويتصور كل الاقتصاديين تقريباً أن ذلك هو نوع من ارتفاع في الأسعار سيجعل العرض والطلب يفرضان تعادلاً جديداً. إن هذا الاستشراف منتشر إلى درجة تجعل المرء يفكر وكأن شركات أغذية الأطفال أطعمتنا إياه.

وكان الرئيس نيكسون قد فرض قيوداً على سعر النفط، أما الرئيس روزفلت فقد أجبرنا على حمل كوبونات حصص البنزين الزرقاء والحمراء. وعندما يصبح الموقف أكثر جدية سيكون هناك ضغط سياسي هائل «لعمل شيء ما». وماذا نتوقع من فترة السنوات الخمس؟

- سنحصل في الشتاء على الجزر والبطاطا والملفوف والبصل والشمندر، وهي منتجات محلية لا تحتاج أن نجلبها جواً من نصف الكرة الجنوبي. كما يجب علينا أن نعوّد أنفسنا على الجزر الأبيض واللفت(7).

- سيكون هناك تشجيع للتخلص من سفرة العمل اليومية الطويلة بالسيارة: وعلى إعادة نقل الوظائف والبيوت، وعلى استخدام النقل العام، وعلى عقد اللقاءات عن بعد.

- تخلص من سيارتك الهمر أو البورش كايين، وابحث عن طريقة أخرى لإظهار هورموناتك الذكرية.

(7) انظر: R. W. Apple, «Four Nations where Forks Do knives Work,» *New York Times* (18 February 2004), p. F1.

ـ ستعاني الزراعة في العالم الثالث بشدة مع النقص في وقود الديزل والأسمدة المعدنية، لذا فإن المجاعة ممكنة.

ـ سيكون هناك اندفاع نحو مكائن الديزل عالية الكفاءة وإلى مولدات الكهرباء من الرياح وإلى أي موقع يمكن تطويره لتوليد القوة الكهرومائية.

ـ سنعاني عنتاً في إنشاء محطات كهربائية تعمل بالفحم أو الطاقة النووية.

ـ اهتمام بالإيثانول والهيدروجين كعوامل خسارة، إذ إنها تكنولوجيات تستهلك من الطاقة أكثر مما تعطي.

أما ضمن الصناعة النفطية فقد انتقلت القيادة التكنولوجية بصورة عامة من شركات النفط الرئيسية إلى شركات الخدمات، مثل شلمبرجر وهاليبرتن[8]، وبدأت شركات النفط الكبرى تشابه شركات خدمات كبرى ترتبط بها بنوك تجارية، وأصبح امتلاك إنتاج النفط يشكل جزءاً متضائلاً من مدخولهم فقط.

يهمني، من منظوري الضيق كجيولوجي ثانية، أمْرُ مجموعة الكفاءات التي ستقوم بإيجاد ما تبقى من النفط، فقد استجاب العديد من الكليات والجامعات لاهتمامات الطلاب ولقضية توفير التمويل للبحوث من خلال وضع كلمة «بيئي» على العديد من برامجهم، فقد أصبحت البيئة ذات سمعة أعلى من أكمال بئر نفطية، فلا يتطلب الأمر ذلك القدر من الصنعة. وتقدم ست مدارس في أميركا الشمالية حالياً تدريباً مناسباً للحصول على وظيفة موظف مستجد في الصناعة

(8) كانت هاليبرتن منذ تأسيسها سنة 1919 حتى سنة 1961 شركة خدمات نفطية ناجحة مقرها في دنكان بأوكلاهوما. لكنها بعد 1961 استحوذت على عدد من شركات التشييد والمقاولات، بما في ذلك كيلوك وبراون آند روت. إن معظم الدعاية السيئة حول هاليبرتن المتعلقة بحرب العراق تتعلق بأعمال البناء والمقاولات.

النفطية[9]. وكذلك، فإن الجيولوجيين الأقدمين في الصناعة كانوا عادة يساعدون المنتسبين الجدد ليتقنوا المهنة. وصناعة النفط من إحدى النواحي صناعة حديثة نسبياً، فقد كان والدي من الرعيل الأول من مهندسي النفط، أما أنا فلست سوى رجل صناعة نفطية من الجيل الثاني. إن فجوة في الاستمرارية تعني خسارة كبيرة من الخبرة العلمية، ويقول عنها ماثيو سيمونز (Matthew Simmons)، وهو مصرفي يتعامل مع مصادر الطاقة في هيوستن: «ليست بدرس للمستجدين»[10].

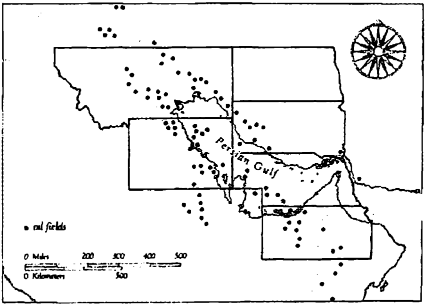
ومذا عن الحرب، وهي الفارس الأول للتنبؤات؟ لقد أصبت بالدهشة في اجتماع بأوروبا حول تجهيزات النفط في ربيع سنة 2003، عندما عرفت أن كل الأوروبيين اعتقدوا إن حرب العراق كانت بكل بساطة للسيطرة على النفط. وكنت آنذاك أقيّم عدداً من الأسباب لغزو العراق (كلها أسباب سيئة، لكني في الوقت نفسه، كنت مسجلاً كعضو في الحزب الديمقراطي). وتقع حقول النفط الرئيسية في الشرق الأوسط في بضع دول، لكن مجمل مساحة المنطقة المنتجة لا يمثل إلا جزءاً من مساحة الولايات المتحدة. وإذا ما أصبحت قضية نقص إمدادات النفط العالمية مؤلمة بما فيه الكفاية فقد يبرز إغراء احتلال المناطق النفطية عسكرياً وتأسيس «محمية عالمية». وربما يقوم بعض البيروقراطيين حتى الآن بجمع بعض التعابير الملطفة لتسويغ مثل هذا المنظور البغيض.

---

(9) أرشح لذلك جامعة تكساس في أوستن وكلية تكساس للزراعة والميكانيك وجامعة أوكلاهوما ومدرسة المعادن في كولورادو وأترك فراغين لكل من يود أن يدرج خياراته الشخصية المفضلة.

(10) ماثيو سيمونز، مراقب مستقل ذو قيمة هائلة، وبخاصة أنه لا يستخدم أساليب هابرت أو معلوماته. ويترأس سيمونز أكبر مصرف تجاري مستقل في صناعة النفط. وتتوفر الأشكال البيانية لمحاضراته على الموقع التالي: www.simmonsco-intl.com، انقر على «Matthew R. Simmons».

وآخر استنتاجاتي يقول إن من أكبر المكونات المفتقدة هو القيادة السياسية. والقيادة لا تعني بالضرورة ملكاً - فيلسوفاً يتصف بالحكمة. وإليك مثلان: كان ونستون تشرشل خلال الحرب العالمية الثانية مستهلكاً يومياً رئيسياً للبراندي. ربما لم يكن يواجه الواقع، لكن التغاضي عن الواقع كان ما تحتاجه إنجلترا بالضبط. كنت في ستاد رايس (Rice Stadium) سنة 1962 عندما أعلن جون كينيدي الرحلات القمرية المأهولة. لقد بدت في حينه فكرة رائعة جداً، وعندما ننظر إليها اليوم نقول إن الرحلات غير المأهولة ربما كانت أفضل. وهناك أيضاً إشاعة تقول إن كينيدي كان يتعاطى الميثامفيتامين(*) (Methamphetamine).



يمكن لحقول نفط الشرق الأوسط كافة أن تتوافق مع المنطقة الشمالية الوسطى للولايات المتحدة، ويأتي أكثر من ربع إنتاج العالم من النفط من هذه المساحة المحددة (جيفري ل. وارد (Jeffrey L. Ward)).

(*) الميثامفيتامين: عقار محفّز قوي المفعول للجهاز العصبي المركزي ويسبب الإدمان.

ولا أدعي هنا أننا بحاجة لرئيس دولة معزز كيميائياً. ما نحتاج إليه هو رئيس دولة يستطيع تجميع الكلمات ليقنعنا بضرورة الحركة قُدماً.

والخلاصة، أن عدداً صغيراً لكنه متنام من جيولوجيي النفط يتفقون على أن إنتاج النفط العالمي سيصل ذروته خلال هذا العقد. وهناك العديد من الجيولوجيين والاقتصاديين وعلماء الاجتماع والإحصائيين ممن لا يتفقون مع هذا الرأي. وهناك البعض ممن يعارضونه بصورة شديدة. وقد تبودلت بعض العبرات غير اللطيفة. وأفضّل في مجتمع مهذب أن أدعوهم بالمعتقدين «بقرن الخصب»(*). وهم يشعرون بأن براعة الإنسان أو اليد الخفية للسوق التجارية ستدفع زمن حصول الذروة بنمو عشرين سنة أو أكثر في المستقبل. أما أنا وزملائي فنحن نتبع بصورة مباشرة أو غير مباشرة م. كينغ هابرت، الذي توقع ذروة إنتاج النفط في الولايات المتحدة قبل أربعة عشر عاماً من حدوثها. وسنقول المزيد عن هابرت لاحقاً، لكنني الآن سأدعو من هم على شاكلتي «الهابرتيون».

كان ألان غرينسبان رئيس مجلس إدارة الاحتياطي الفيدرالي يحذرنا من إمكانية نقص الغاز في أميركا الشمالية[11]. وليس ذلك شيئاً مُسِرّاً. وهناك بعض الخيارات بالنسبة للغاز الطبيعي: استيراد الغاز المسيَّل وخطوط أنابيب من المنطقة القطبية ونقل بعض العمليات الكيميائية ـ والمهن المتعلقة بها ـ في ما وراء البحار،

(*) قرن الخصب (Cornucopia): هو رمز لوفرة الغذاء والغلال منذ الأزمنة الإغريقية.

(11) إفادة ألان غرينسبان أمام لجنة مجلس النواب عن الطاقة والتجارة في 10 حزيران/يونيو 2003 موجودة على الموقع: http://www.federalreserve.gov/boarddocs/testimony/2003/20030610/default.htm.

واستبدال محطات توليد الكهرباء بالغاز الطبيعي إلى الفحم أو (يا إلهي) إلى محطات نووية. وأخيراً وعلى وجه التخصيص صيانة موارد الغاز. أما النفط، فهو قضية أكبر وأكثر قتامة.

يحاول معظم المؤلفين إقناع قرائهم في مدخل الكتاب إلى إن كتابهم ذو أهمية. ورغم المجازفة بالسير على هذا المسلك البالي، دعونا نحاول الإجابة عن سؤال تتوفر له عدة إجابات:

من له الفضل في انهيار الاتحاد السوفياتي؟

أ ـ رونالد ريغان، لترويجه حروب النجوم.

ب ـ البابا، لكونه بولندياً.

ت ـ ميخائيل غورباتشيف، لسماحه بالانشقاق.

ث ـ الـ KGB (الاستخبارات السوفياتية)، لإساءتها معاملة الناس.

ج ـ أرامكو السعودية، لخفضها سعر النفط.

يشير ستيفن كوتين (Stephen Kotin) إلى أن الاتحاد السوفياتي كان غداة 1985 يصدر نحو مليوني برميل من النفط يومياً[12]. وأتاحت العملة الصعبة من هذه الصادرات للسوفيات استيراد المواد المفتقدة داخلياً، ابتداء من الإلكترونيات وحتى الصابون. وكان الإنتاج السوفياتي في ذلك الحين يفوق الإنتاج السعودي ثلاث مرات، لكن كُلَف الإنتاج لدى أرامكو السعودية كانت أقل بكثير، ولجأت أرامكو السعودية إلى تكتيك معروف: حرب سِعْرية. أغرقوا العالم بالنفط، وادفعوا بالسعر العالمي للنفط الخام إلى مستويات

---

(12) انظر: Stephen Kotkin, «What Is to Be Done?,» *Financial Times* (6 March 2004), pp. 16-22.

دون كلفة الإنتاج والنقل للنفط السوفياتي. وتروي القصة التالية النقص الخانق في كافة الحاجات التي نشأت في الاتحاد السوفياتي:

يذهب رجل أعمال بولندي إلى موسكو فتسأله زوجته أن يجلب معه أمثلة عن شح المواد في روسيا. يذهب الرجل إلى محل لحوم، حيث لم يجد إلا بقايا قليلة من لحم الخنزير المقدد. لذا يدوّن في دفتر ملاحظاته (لا يوجد لحم). ويذهب بعد ذلك إلى محل خضار ويكتب (لا يوجد خضار)، ثم إلى محل أحذية ويكتب (لا توجد أحذية). وبعد عدة مخازن أخرى يوقفه رجل في الشارع ويسأله «هل تقوم بالتجسس لصالح وكالة الاستخبارات المركزية؟»، فيوضح رجل الأعمال أن زوجته فقط طلبت منه أن يدون بعض الملاحظات، فيقول الرجل «ألا تعلم أن عملك هذا قبل عشر سنوات كان يعني إعدامك رمياً بالرصاص؟»، فيكتب في دفتره (لا يوجد رصاص).

وبعد ستة أعوام دون عملة صعبة، انهار الاتحاد السوفياتي، لذا فإن التحكم في مصدر الطاقة الرئيسي في العالم يجلب لحامله قوة هائلة، والنفط حالياً سلعة عالمية، فناقلات النفط العملاقة تحمل النفط إلى الطرف الثاني للكرة الأرضية بكلفة دولارين للبرميل، ونظام النقل لدينا يدار بواسطة المنتجات النفطية بصورة كلية تقريباً. وكما عرفنا خلال نهاية السبعينيات، فإن شحة في تجهيز النفط يمكن أن تتذبذب خلال اقتصاد البلد وتخفض معها مستوى المعيشة.

إن موضوع اهتمامي ليس حول التكيف على المدى البعيد مع عالم ما بعد النفط، فقد فرَّطنا من خلال عدم اهتمامنا بالسنين التي كان يمكن استغلالها للتهيؤ لنقص الإمدادات النفطية. وتعتبر السنين العشر القادمة حاسمة، فستكون بمثابة تدريب من خلال الممارسة، والتعلم من خلال العمل ليس بالضرورة أكثر الطرق تنظيماً للتكيف.

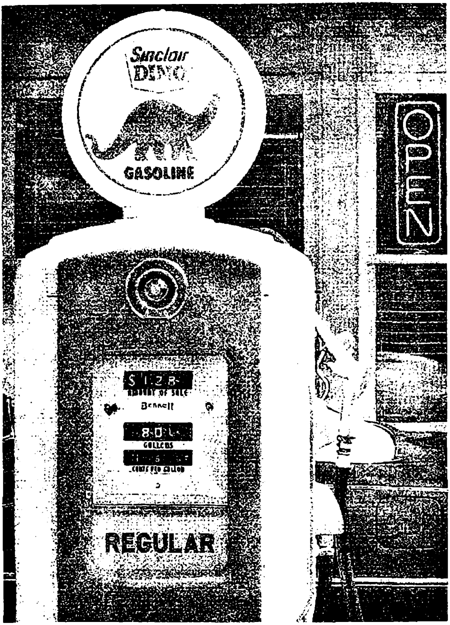
إن هذا الكتاب، كما أسلفنا، يبحث في أنواع الوقود - غير النفط - التي تستخرج من باطن الأرض. ولما كنت جيولوجياً، فلست أمتلك معرفة تمكّنني من المشاركة بها حول الخلايا الشمسية أو الوقود الحيوي أو قوة المد البحري. وكمقدمة لأنواع الوقود الأخرى، سيوضح الفصل التالي أسباب احتمالية انخفاض إنتاج النفط الخام. ولو كان النفط متوفراً ورخيصاً فلن تبرز الحاجة لتطوير أنواع الوقود الأخرى.

الفصل الثاني
كيف تكوَّن النفط؟

كانت شركة سنكلير تعرض عندما كنت صغيراً صورة ديناصور كعلامة تجارية. واعتقدت مثل معظم الأطفال أن النفط في أعماق الأرض ربما يكون قد اعتُصِر من أجسام الديناصورات الميتة. لكني بدأت أشك في ما بعد بما إذا كان معظم النفط قد تكون خلال العصر الذي عاشت فيه الديناصورات. لكن القصة الحقيقية تتألف من بضعة مكونات:

ـ يتولد في أحواض على أطراف محيطات العالم، أماكن مثل: البحر الأحمر، والبحر الأصفر، والبحر الأسود. في بعض الأحيان نظام دوران يؤدي إلى احتباس المغذيات البحرية، فتسقط النباتات والحيوانات الميتة والمخلفات من سطح الماء وتجر المغذيات معها. وعادة ما تتم أكسدتها بواسطة الباكتيريا في قعر البحر، مما يطلق المغذيات لتعود إلى الماء. وينقل هذا السقوط المستمر المغذيات من السطح إلى المياه العميقة. وعندما يكون هناك في أحد الأذرع البحرية تبخر أكثر (بسبب الشمس والريح) من مدخول الماء العذب، أكان من الأنهار أو الأمطار، فإن ذلك يولد نظام دوران يسحب ماء المحيط الضحل ويعيد إلى المحيط مياهه العميقة الغنية بالمغذيات.

أما إذا كان المدخول من الأنهار وما يضاف إلى ذلك من مياه الأمطار يتجاوز التبخر السطحي، فيتم عند ذلك دفع المياه السطحية المنضبة من المغذيات، وتزدهر الحياة البحرية السطحية حيثما تمتزج المياه العميقة المحملة بالمغذيات، وهي صاعدة نحو السطح، وتعتبر مركبات الفوسفات والنترات المغذيات الأساسية. ويقارب البحر الأسود أن يكون مثالاً معاصراً، وكان قعر البحر الأسود قبل نحو ألف سنة مستنزفاً بصورة كاملة من الأوكسيجين، وكانت رواسب ذات محتوى يزيد عن 10٪ من المواد العضوية قد بقيت في قعر البحر. والرواسب الغنية بالمواد العضوية ليست شيئاً واسع الانتشار، فأقل من 1٪ من الصخور الرسوبية تحتوي على أكثر من 5٪ من الكاربون العضوي. ولو كانت الصخور الرسوبية الغنية بالعضويات مبتذلة لكُنا نسبح اليوم في بحار من النفط.



العلامة التجارية لشركة سنكلير (Sinclair) قادت العديد من الأطفال من جيلي إلى الاعتقاد بأن أصل النفط هو الديناصورات. وهذه مضخة قديمة محدّثة حينما كان سعر البنزين 16 سنتاً للغالون. (توم وورنر (Tom Worner) من وكالة (Associated Press) في جريدة: *Tyler Morning Telegraph*.

ـ إن دفن الرواسب الغنية بالمواد العضوية في صخور على أعماق تزيد على 7500 قدم سيأخذ بها إلى منطقة ذات مدى حراري يبلغ (نحو 175ف)، وذلك يسبب تكسر الجزيئات العضوية الكبيرة إلى جزيئات أصغر. والجزيئات التي تحوي ما بين خمس ذرات وعشرين ذرة من الكاربون تكون سائلة: أي نفط خام. أما الجزيئات ذات ذرات الكاربون الأقل من خمسة، فهي غازية في درجة حرارة وضغط الغرفة: أي أنها غاز طبيعي. ويدعى العمق 7500 قدم بـ«قمة نافذة النفط».

ـ أما دفن الرواسب أو النفط على أعماق تتجاوز 15000 قدم، فيديم عملية تكسر الجزيئات حتى يصبح المنتوج الباقي ذا ذرة كاربون واحدة في الجزيئة. ويدعى الغاز الذي أصبح تقريباً ميثان نقي (CH_4) بغاز طبيعي «جاف»، ويدعى حد الـ 15000 قدم بالنافذة السفلى للنفط. وإذا ما كنت تبحث عن النفط فأنت بحاجة لرواسب غنية بالعضويات دفنت في وقت ما من تاريخه على أعماق لا تتجاوز نافذة النفط.

ـ بعد أن يتحرر النفط الخام في النافذة النفطية يكون له ميل إلى الهجرة إلى الأعلى. والنفط غير قابل للذوبان في الماء، ويطفو على سطحه لأنه أخف منه. (ويجد نحو 90٪ من النفط، أي غالبيته، طريقه إلى السطح كتسربات نفطية. أما البقية، البالغة 10٪ أو أقل، فتبقى محتبسة تحت الأرض في مواقع ليس لها اتصال جيد مع السطح، مثل القبب النفطية والشعاب الأحفورية والعدسات الرملية وحتى في القليل من أماكن اصطدام النيازك بالأرض).

ـ لا توجد تجاويف كبيرة في الأعماق التي تصل إليها آبار النفط، فالنفط يكون محتبساً في صخور ذات مسامية عالية تعرف بصخور المكمن («المسامية العالية» هنا تعني أكثر من 5 بالمائة).

ويستخرج نصف المنتوج العالمي للنفط تقريباً من مكامن تقع في الصخور الرملية. ويستخرج معظم الباقي في مكامن تقع في الصخور الكلسية أو في الدولوميت (Dolomite). والحجر الكلسي - والذي هو كاربونات الكالسيوم $CaCo_3$ - يتكون على الغالب بواسطة النباتات والحيوانات البحرية في مياه المحيط السطحية. أما الدولوميت فهو كاربونت الكالسيوم والمغنيسيوم $CaMg(CO3)2$، فلا يزال تكوينه غير مفهوم بصورة كاملة، لكنه واحد من أفضل مكونات صخور المكائن.

- يجب أن تكون المسامات (أو الثقوب) في الصخر مرتبطة ببعضها بحيث يتاح للنفط أو الغاز الجريان داخل الصخر. وتدعى الارتباطية بين المسامات بالنفاذية (Permeability). وتمثل فقاعات الغاز في الحمم البركانية المتجمدة مسامات لا يرتبط بعضها ببعض. وتعتمد النفاذية على مربع حجم الحبة الرملية. أي أن مضاعفة حجم حبة الرمل في الصخر الرملي يزيد النفاذية بمُعامل يبلغ أربعة، أما مضاعفة حجم الرمل عشر مرات فسيجعل النفاذية أكبر بمليون مرة.

- يجب أن يكون هناك طبقة صخرية واحدة على الأقل في المكمن النفطي والسطح لتكوين مانع تسرب محكم يدعى بالغطاء الصخري (Caprock). وغالباً ما يتم بطريقة مخطوءة أعتبار أول طبقة فوق صخرة مكمن تجاري غطاءً صخرياً، رغم أنها عادة وببساطة صخرة مكمنية مشبعة بالنفط، ولكن بكميات غير تجارية. وواحد من الأسئلة المفضلة لدي للواجب البيتي لطلابي هو: كم هو الوقت المستغرق لتفريغ حقل نفطي حجمه مليار برميل من خلال تسرب مقداره نقطة واحدة في الثانية. والإجابة هي 100 مليون سنة. إن منتصف فترة العصر الطباشيري (Cretaceous period) كانت قبل نحو 100 مليون سنة، والعديد من الحقول النفطية أقدم من ذلك. لكن

الأغطية الصخرية هي مواد خاصة: طبقات من الحجر الطيني دقيق الحبيبات وطبقات من المتبخرات مثل ملح الطعام الصخري (الهالايت) وكبريتات الكالسيوم اللامائية (الانهيدرايت).

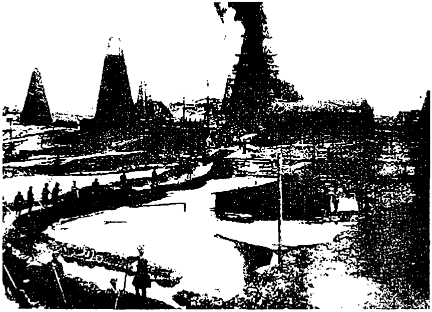
وهكذا نرى على قائمتنا سبع مكونات أساسية. وما الذي سيحدث إذا افتقدنا واحداً أو أكثر منها؟ الإجابة صفر من النفط. وللطبيعة طريقة غريبة في تقييم الاختبارات، فأنت تجيب على الأسئلة السبع، لكن درجتك للامتحان الكلي أقل عما حصلت عليه لأي من الأسئلة السبع.

وبسبب هذا النظام الغريب للتقييم، لا تحصل على درجات عالية شاملة إلا مواقع قليلة جداً في الأرض، فكل شيء يجب أن يكون صحيحاً، أو صحيحاً تقريباً. يقع الشرق الأوسط في قمة القائمة. صخور منشأ ممتازة مدفونة في وسط النافذة النفطية، والصخور قد تشكلت بهيئة قباب صخرية. ويلي ذلك في القائمة منطقة غرب تكساس وبحر الشمال وبضعة عشر موقعاً آخر، وكلها سجلت درجات جيدة على الأسئلة السبع. أما معظم البقاع الأخرى، فقد رسبت، إذ سجلت درجة صفر على واحد أو أكثر من الأسئلة. وتغطي الحقول النفطية أقل من 0,1 بالمائة من مساحة القارات والجرف القاري[1]. والقليل من المواقع غنية بالنفط إلى درجة لا تصدق، لكن غالبية المناطق لا تمتلك أي نفط. قد يبدو ذلك غير عادل، لكن تلك هي طريقة الطبيعة في إعطاء الدرجات.

---

(1) انظر: Sam Carmalt and Bill St. John, «Giant Oil and Gas Fields,» in: Michel Thomas Halbouty, ed., *Future Petroleum Provinces of the World*, AAPG memoir; 40. Proceedings of the Wallace E. Pratt Memorial Conference (Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 1986), pp. 11-53.

تمتلك الولايات المتحدة وروسيا تاريخاً طويلاً ومعقداً في إنتاج النفط، وتضع بعض الجداول الزمنية تاريخ اكتشاف حقول نفط باكو في أذربيجان قبيل بئر دريك، الذي حفره سنة 1859[2] (وسأقوم في ما تبقى من هذا الكتاب باستخدام بئر دريك مجازياً كبداية للصناعة النفطية. وسوف لن أتوقف كل مرة لتوضيح خيارات ما قبل دريك)



تبين هذه الصورة غير المؤرخة أبراج الحفر القديمة قرب باكو (Baku) على بحر قزوين. وتقول بعض الروايات إن اكتشاف هذا الحقل استبق بئر دريك (Drake) التي حفرت سنة 1859 بعشر سنوات (من SOVFOTO).

إن المملكة العربية السعودية اليوم هي صاحبة الإنتاج السنوي الأكبر، تليها في الموقعين الثاني والثالث روسيا والولايات المتحدة. لكن التباين يظهر في عدد الآبار المنتجة:

(2) انظر: Edgar Wesley Owen, *Trek of the Oil Finders: A History of Exploration for Petroleum*, Memoir - American Association of Petroleum Geologists; 6 (Tulsa, Okla.: American Association of Petroleum Geologists, 1975), pp. 11-12.

	الإنتاج ملايين البراميل/اليوم	عدد الآبار المنتجة
العربية السعودية	7,7	1,560
روسيا	7,4	41,192
الولايات المتحدة	5,8	521,070

لقد عانت صناعة النفط الروسية خلال الحقبة الشيوعية والحقبة التي تلت مباشرة من الصيانة المؤجلة ومن سوء الإدارة، لكن أسعار النفط العالمية العالية والصيانة المحسّنة بعد سنة 2000 زادت من إنتاج النفط الروسي، ولم تأتنا أي تقارير عن اكتشافات رئيسية للنفط في روسيا حتى الآن. ويبقى السؤال فيما إذا كانت هذه النهضة في الإنتاج الروسي تصحيح منفرد للأخطاء السابقة أو أنها ستصبح صناعة نامية.

التنقيب عن النفط

«هل هي منطقة نفطية؟» كان ذلك السؤال الأول الذي يُسأل عن المنطقة. وإذا ما كان هناك آبار منتجة في المنطقة فالجواب بداهة: نعم، أما إذا كانت المنطقة غير منقب فيه، أو أن عدداً قليلاً من الآبار الجافة كانت قد حفرت فيها، فالإجابة ستكون: ربما. وإليك بعض الطرق للحصول على إجابات من دون الحاجة لحفر عدد كبير من الآبار الجافة:

ـ حتى سنة 1930 كانت التسربات الطبيعية للنفط دليلاً مهماً، فإذا ما رأيت غشاة متقزح اللون على ماء راكد، اعبث به بواسطة غصن شجرة، فإذا ما تجزأ إلى أطواف منفصلة فهو غشاء من أوكسيد الحديد، أما إذا تشوه لكنه بقي صقيلاً فهو مادة نفطية.

ـ ربما تكون الآبار الجافة الموجودة في المنطقة قد صادفت

«آثاراً» نفطية غير تجارية، إذ يمكن أن تكون البئر الجافة قد فشلت في واحد من الأسئلة الأربعة الأخيرة (هجرة النفط، نوعية صخور المكمن، النفاذية، الطبقة الخاتمة المانعة للتسرب).

- تقوم الشركات الرئيسية في بعض الأحيان بالمجازفة بحفر «اختبار للبدء» في موقع بعيد عن القباب أو أي من المصائد المتوقعة للنفط. وتقوم بتقاسم العينات، فتجري كل شركة اختباراتها على صخور المنشأ التي كانت في النافذة النفطية.

يقر جيولوجيو الاستكشافات بأن القليل من الآبار الجافة لا تحكم على منطقة بأنها خالية من النفط، وإذا ما توفرت أدلة معقولة على أن المنطقة قد تكون نفطية فسيستمرون بحفر آبار أخرى مبتعدين عن البئر الأولى حتى يُقطع المورد المالي.

وكان التنقيب تاريخياً يجري من خلال البحث عن قباب دائرية تقريباً أو عن طيات محدبة يمكن أن تكون مصائد نفطية. وتكون البنية الجيولوجية في مناطق المناخ الجاف واضحة بسهولة، لكن المنكشفات الصخرية بارتفاع بضعة إنشات بجانب جداول المياه تبدو حتى في مناطق الأدغال. وقد ساهمت سنة 1953 في آخر جولة على وجه التحديد من التنقيب السطحي في وايومنغ. وقد استندت كافة أعمال الحفر في العراق(*)، ومن الممكن أيضاً في إيران، على الظواهر السطحية.

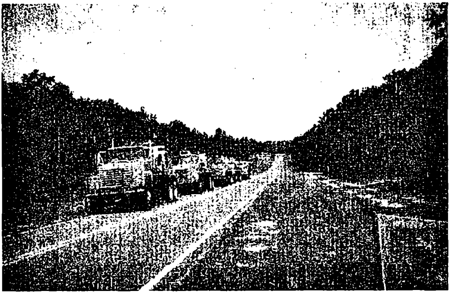
(*) بالنسبة لعراق يمكن أن يكون ذلك صحيحاً للجزء الشمالي من القطر، أما في الجزء الجنوبي الرسوبي، من بغداد شمالاً وحتى الخليج، فذلك غير ممكن، لوجود غطاء طيني غريني يبلغ سمكه نحو 100 قدم.


دليل سياحي يقوم بجرّ بعض من القار الطازج من تحت بركة من ماء المطر في بحيرة القار على جزيرة ترينيداد (Trinidad) (شيرلي باهادور Shirley Bahadur، أسوشيتد برس).

ولا يتطلب الأمر أكثر من بضعة عشرات من الأقدام من التربة الاستوائية الثقيلة أو الحصى التي تركها العصر الجليدي أو الترسبات الحديثة لتجعل الاستكشاف السطحي مستحيلاً. وكانت أولى الارتدادات الزلزالية قد سجلت في أوكلاهوما سنة 1922[3]، فقد ولدت انفجارات بالديناميت قرب السطح موجات صوتية وقامت مستشعرات ذات دقة عالية بالتقاط الحركة السطحية للصوت المرتد. ولا تزال المتفجرات تستخدم في المناطق الجبلية أو في الغابات والأدغال، رغم أن الديناميت استبدل بمزيج من نيترات الأمونيوم

(3) انظر: George Elliott Sweet, *The History of Geophysical Prospecting* (Suffolk, U. K.: Neville Spearman, 1975), pp. 86-88.

والنيتروميثان. وكنت أخشى أن سر هذه الخلطة سينكشف خارج المهنة، لكن المتوفى تيموثي ماك فاي (Timothy McVeigh) استخدم براميل من نيترات الأمونيوم و النيتروميثان في قنبلته التي فجرها في مدينة أوكلاهوما[4].



تقوم خمس سيارات توليد ذبذبات بإرسال موجة صوتية في الأرض من دون أن تخرب الطريق المعبّد.

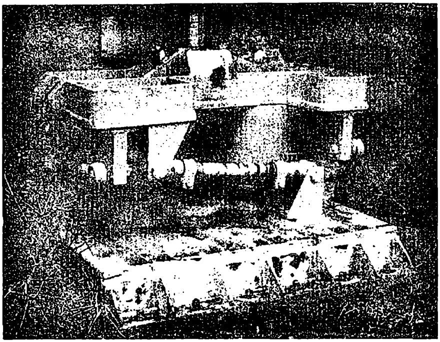
وقد تم استبدال المتفجرات على الأرض (المستوية) في الغالب بمولدات ذبذبة مركبة على شاحنة ثقيلة لتولد موجات صوتية. وتم كذلك استبدال المدونات الفوتوغرافية السابقة بتسجيلات حاسوبية رقمية. أما الحسابات التي قمت بها سنة 1952 يدوياً فقد استبدلت

(4) انظر: Lou Michel and Dan Herbeck, *American Terrorist: Timothy McVeigh and the Oklahoma City Bombing* (New York: Harper Collins, 2001), pp. 215-219.

بعدد من حواسيب IBM الرئيسية. ولم تكن القضية مجرد استبدالي شخصياً باحتساب (computing) من نوع أرخص، بل إن المعالجة الزلزالية وصلت إلى حد من التعقيد كان من المستحيل إجراؤها بواسطة حسابات يدوية. ورغم التحسينات التي طرأت على الاستكشافات الزلزالية، إلا أنها تكلف على اليابسة عشرة أضعاف كلفتها لكل ميل مربع من الاستكشاف الزلزالي البحري.

والاستراتيجية هي ذاتها في البحار لكن المعدات تختلف، فقد استبدلت المتفجرات بقاذفات هوائية تطلق هواء مضغوطاً خلال صمامات سريعة العمل لينتج عنها فقاعات تحت الماء. ويتم سحب خيوط تحمل متحسسات للصوت على قصاصات طويلة متوازية وراء الباخرة. ويتحرك كل هذا باستمرار أربعة وعشرين ساعة يومياً بسرعة ميلين أو ثلاثة في الساعة. وحتى المعالجة الحاسوبية كانت في إحدى الفترات تجري على متن السفينة. وكان ثالث أكبر تجميع للحواسيب الكبيرة في سنة 1998 تقريباً يعمل على متن سفينة استكشاف زلزالية. لكن إرسال المعلومات إلى مراكز الحواسيب على الأرض أصبح في النهاية ذا جدوى اقتصادية أكبر[5].

(5) انظر: John Sherman and Murray Roth, «Linux Arrives in Upstream Computing,» *The American Oil and Gas Reporter* (November 2001).



تقوم كتلة معدنية تحت مركز كل سيارة بنقل ذبذبات زلزالية إلى الأرض، وهي أرض معشبة في هذه الحالة.

ولم يكن سبب ذلك عدم ملائمة وضع الحواسيب على متن السفن، بل لأنه كان بإمكان الخبراء التعامل مع أكثر من سفينة استكشاف واحدة في محطة الحواسيب على الأرض.

وكانت كافة الارتدادات الزلزالية تجري منذ بداياتها سنة 1922 لغاية 1995 على خطوط طولية، لذلك يتم تحريك سلسلة مستقيمة من المتحسسات الزلزالية ومصادر الصوت على طول خط مستقيم. لكن الخطوط أصبحت تستبدل ببطء بشبكة مستطيلة الشكل من المتحسسات وتحتل مصادر الصوت فيها العديد من المناطق داخل الشبكة، وهذا ما يعرف بالتحسس الزلزالي ثلاثي الأبعاد (3-D Seismic). وقد تم كذلك اللجوء إلى استخدام أمواج القص (Shear Waves) إضافة إلى الأمواج الانضغاطية. والأمواج الانضغاطية هي في الأساس شبيهة موجات الصوت في الهواء. أما أمواج القص فتتحرك

من جانب إلى جانب وترسل خلال المواد الصلبة فقط، والسوائل والغازات لا تمتلك قوة قص ولا تتمكن من إرسال أمواج القص.

وكان الهدف من إجراء الاستكشاف الزلزالي المبكر هو اكتشاف التراكيب الجيولوجية وحسب، مثل الطيات المحدبة والقباب الملحية والتصدعات (Faults). وكانت الخطوط الزلزالية حتى قبل توفر التحسس الثلاثي الأبعاد تستخدم لاكتشاف الشعاب الأحفورية (Fossil Reefs) تحت السطحية. أما باستخدام الاستشكاف الثلاثي الأبعاد، فقد أصبح مستوى التفاصيل مدهشاً في بعض الأحيان. ويمكن تصوير معالم صغيرة، مثل مجاري الأنهار المملوءة بالأتربة.

ويمكن في المناطق الناضجة وجود مئات، إلى الآف الآبار في مساحة طولها عشرة أميال، وعرضها كذلك. ويتم أخذ سجلات كافة الآبار بواسطة إنزال متحسس على كابل معدني داخل البئر. ويضم المتحسس كاشفات لنحو عشرين خاصية فيزيائية (وقد قام الإخوة شلمبرجر (Schlumberger) سنة 1927 في فرنسا باستخدام هذه التقنية. وقد تطورت شلمبرجر منذ ذلك الحين لتصبح شركة خدمات حقول نفطية شاملة). ويتم إطلاق معظم السجلات في الولايات المتحدة إلى الأرشيف العام. لذا، فبإمكان أي جيولوجي مستقل أن يقوم بإنشاء خرائط تحت ـ سطحية.

حقوق الحفر

يختلف امتلاك الرواسب تحت السطحية من قطر إلى آخر. ولما كان المَلِك يتملّك كل حقوق المعادن، قام من يستخرجون هذه المعادن بدفع مبلغ يعرف بالريع (Royalty) إلى التاج الملكي. وتحتفظ الحكومات في معظم الأقطار اليوم بحقوق المعادن والنفط تحت الأرض. وقد تمنح الشركات النفطية حقوق استكشاف وإنتاج

وبيع النفط مقابل ريع هو نسبة مئوية من الدخل المتحقق من المبيعات. وقد أصبحت النسبة المئوية التي تدفع للحكومات أكبر بإضافة ضرائب المكوس وضرائب التصدير وبواسطة المشاركة من قبل شركة نفط حكومية (لا تتكبّد عنها أي دفوعات). وحتى عندما كانت حقوق الاستكشاف والإنتاج في موضعها سابقاً، فإن العمليات النفطية جرى تأميمها. ولا تزال ذكرى تأميم النفط الذي تم سنة 1938 في المكسيك يحتفل بها حتى الآن. ومنذ ذلك الحين قامت كل من فنزويلا والعراق وإيران والعربية السعودية بإعادة عمليات إنتاج النفط إلى شركات نفط مملوكة حكومياً. ولا أنظر إلى هذا الأمر كقضية أخلاقية، فالحكومات انتبهت ببساطة إلى كون الأعمال النفطية مربحة جداً، ودخلت غير مدعوّة في عملنا الخادع.

وهناك في الولايات المتحدة خليط من أنواع الحقوق فيما يتعلق بالنفط والغاز. وتدعى حقوق ما تحت الأرض، حتى في البقعة النفطية، حقوق «التعدين». ويعني امتلاك الأراضي الخاصة التي اقتنيت لإنشاء المساكن أو لأغراض أخرى، معظمها إن لم يكن كلها، امتلاك ما على الأرض وما تحت الأرض. ويمكن بعد اقتناء الأرض بيع وشراء حقوق ما تحت الأرض بصورة مستقلة. وقد ورثت من أمي مجموعة متنوعة من أسهم صغيرة من حقوق التعدين في الجزء الجنوبي الأوسط من أوكلاهوما. ويوجد في اوكلاهوما قانون «تجميع جبري» يتطلب ممن يقوم بالحفر أن يمتلك ما لا يقل عن 63٪ من حقوق التعدين. ويجب على بقية الشركاء بعد ذلك المساهمة بقيمة سوقية عادلة يجري تقريرها في جلسات أمام هيئة الشركات في الولاية.

وتبقى بقية حقوق التعدين مع الولاية ومع الحكومة الاتحادية. وقد ادخرت بعض حقوق التعدين والحقوق السطحية لبعض أراضي

الولايات لتمويل التربية، وغالباً ما يجري ذلك على أساس ميل مربع واحد من كل ثمانية عشر ميلاً.

وتلك هي الطريقة التي حصلت جامعة تكساس في أوستن بواسطتها على وقفية لا تفوقها فيها إلا جامعة هارفارد. وتتحكم الحكومة الاتحادية بحقوق التعدين تحت الغابات الوطنية وتحت الأراضي التابعة لمكتب إدارة الأراضي وتحت معظم الأراضي المخصصة للهنود الحمر. أما المتنزهات الوطنية فيحرم الحفر فيها. وتتحكم الولايات بحقوق الحفر في المياه الأقليمية بعمق ثلاثة أميال وما يتجاوز ذلك بعداً عن الساحل تعتبر حقوق التعدين فيه تابعة للحكومة الاتحادية. وتقوم إحدى شركات النفط بمفردها عادة بترشيح إحدى قطع الأراضي لغرض وضعها في مزايدة. وتقوم الحكومة الاتحادية، وحسب خيارها، بإدارة طلب عروض (مغلقة) وهو متاح لكل من يرغب بالمشاركة للحصول على حقوق الحفر. وكانت واحدة من أولى المهمات التي كلفت بها في أول صيف عملت فيه مع شركة شل، وذلك سنة 1953، هي تقييم قطعة أرض جرت المزايدة عليها مؤخراً. وكانت شركة أخرى قد رشحت القطعة وقررت شل المشاركة في المزايدة لكي تضفي نوعاً من الصدقية. وقد رست المزايدة على شل، وكان علينا آنذاك تقييم ما قمنا بشرائه.

ولا يستطيع الشخص أو الشركة التي قامت باستئجار الحقوق تحت ـ السطحية أن يقوم ببساطة باقتحام المنطقة ويعيث فساداً في الممتلكات السطحية فيها، فلمالك المنشآت السطحية الحق في الحصول على تعويض عن استخدام الأرض. ويمثل التلوث بالنفط أو بالكيميائيات قضية حساسة. وقد طلبت إحدى شركات خطوط الأنابيب مني تأجيرها زاوية من أرض ورثتها في مروج أوكلاهوما تبلغ مساحتها إيكران (Two Acre) لغرض بناء محطة ضخ. وقد

رفضت إيجارهم إياها لأن بإمكانهم إقفال ما استأجروه وترك المحل، تاركيني لأتحمل كلفة تنظيف الأرض. لذا عرضت بدل ذلك بيعهم الإيكرين، وهذا ما تقبلوه في النهاية. لكنهم لم يبنوا محطة الضخ واستمرت الأبقار ترعى في القطعة بحريتها.

وعندما يجري الحفر على أراض تخص الولاية أو الدولة يكون أي ضرر للمنشآت السطحية قضية تهم الجميع. لكن وضع حظر شامل كافة الأراضي الاتحادية يقضي بعدم الحفر ليس خياراً مطروقاً، والسبب أن مثل هذا الحظر في وقت سنكون فيه متعطشين بدرجة كبيرة إلى النفط سيكون صنواً للانتحار الاقتصادي، لذا استوجب الأمر إيجاد توازن بين الأثر المتوقع على سطح الأرض وبين تزويد عجلة الاقتصاد بالنفط والغاز، وهذا أمر ربما كان بالإمكان تدبره. والمشكلة الكبرى هي الأثر غير المتوقع الذي قد يحدث على سطح الأرض، فالحوادث لا تزال تقع، وعند وقوعها تجتذب قدراً كبيراً من الدعاية. ورغم أني واع أن الحوادث في الحقول النفطية قد تناقصت عبر السنين، إلا أن ذلك لا يخدم إلا كمحاججة للذات. وأفضل خبر هو أن منتسبي فرق مكافحة الحرائق النفطية الأسطوريين يتناقصون بسرعة بسبب الفاقة، وقد ولدت حربا الخليج، في الكويت سنة 1991 وفي العراق سنة 2003، معظم مدخولهم. ولا من داع لإخبار نادي السييرا[6]. لكن الحوادث في المنشآت البحرية التي تنأى عن التحكم يتم تسجيلها رسمياً على الإنترنت. ورغم أن هذه التقارير لا تشجع على العمل على المنصات البحرية، إلا أن القليل جداً من

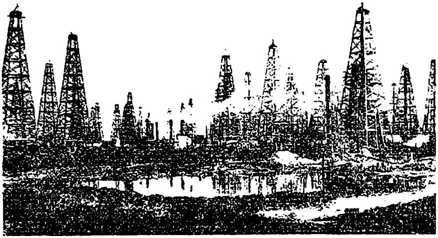
---

(6) نادي السييرا (Sierra Club): هو أكبر وأقدم، وفي منظوري أحسن منظمة للحفاظ على الموارد الطبيعية. وأنا استخدم "نادي السييرا" مجازياً للدلالة على كافة المنظمات من هذا النوع. والموقع الاتحادي على الشبكة الذي يسجل حوادث الحفر البحرية هو: http://www.mms.gov/incidents/blow92.htm#top.

هذه الحوادث تتضمن أي إصابات، لكن بعضها قد يتسبب في تسرب برميل فقط في مياه خليج المكسيك. وإذا ما استهواك هذا الموقع على الإنترنت، فعليك من جهة أخرى التوجه إلى مورغان سيتي في ولاية لويزيانا حيث يجري التوظيف في منصات الحفر البحرية.

أساليب الحفر

تمثل اقتصاديات الحفر موضوعاً ذا أهمية هائلة. ولو كانت عمليات الحفر أقل كلفة لكنا نقوم بحفر آبار استكشافية ذات مخاطرة أعلى. ونستطيع ضمن الحقول المثبتة حفر عدد أكبر من الآبار لنحصل على استخلاص أفضل. لقد كانت الآبار قبيل سنة 1900 تحفر بطريقة (الحفر بالطُرْق) وذلك بإسقاط إزميل كبير معلق في نهاية حبل. وجعلت أبراج الحفر الدورانية سنة 1901 ساحل خليج المكسيك متاحاً لعمليات الحفر. يقوم برج الحفر الدوار بتدوير عمود من أنابيب الحفر الثقيلة المرتبطة ببعضها. كان هذا العمود في الأصل يحمل في نهايته السفلى لقمة مسننة دوارة، وكان سائل خاص رقيق يدور هابطاً إلى الأسفل خلال أنابيب الحفر ليعود صاعداً في المجال خارج الأنابيب. (صُمّم النوع السائد من لقم الحفر من قِبَل والد هاوارد هيوز (Howard Hughes). وأتاح الدخل الكبير المنتظم من شركة هيوز لابنه أن يجري تجاربه على الطائرات والأفلام السينمائية والإلكترونيات وممثلات السينما، مثيلات جين هارلو (Jean Harlow)، وجين راسل (Jean Russel)، وجنجر روجرز (Ginger Rogers)، ولانا ترنر (Lana Turner)، وآفا غاردنر (Ava Gardner)، وريتا هايورث (Rita Hayworth)، وكاترين هيبرن (Katharine Hepburn)، وبيتي ديفيس (Bette Davis)، وبوليت غودارد (Paulette Goddard)، وجين تيرني (Gene Tierney)، وتيري مور ((Terry Moore).



كانت البئر الاكتشافية في سبندلتوب (Spindletop) قرب بومونت (Beaumont) في تكساس (Texas) قد حفرت سنة 1901. وتُظهر هذه الصورة التي تعود إلى سنة 1902 كيفية تطور الحقل بسرعة (2003 AP/ Wide World Photos).

أما أنا، فأراقب بتحفز أي شيء قد يساعدني في خفض كُلَف الحفر، وقد جرّب عدد من الأفكار الغريبة في هذا المضمار. واليك بعض من آخر الأحداث:

- الحفر المائل، وكان في الأصل طريقة بارعة للوصول إلى بئر تحت بحيرة، أو تحت بناية مجلس النواب لولاية أوكلاهوما. ومع تحسن التقنية أصبح بالإمكان حفر الآبار باتجاه تسعين درجة عن الثقب الأصلي العمودي، أي إلى بئر أفقية. ويمكن بهذه الطريقة في الحفر أن تُتابع طبقة منتجة لمسافة قد تبلغ نصف ميل بعيداً عن نقطة الحفر. وعندما لا يمكن تزويد لقمة الحفر بالطاقة لتدويرها بواسطة تدوير أنبوب الحفر يصار إلى تدويرها بواسطة توربين يعمل بضغط سائل الحفر يقع فوق اللقمة مباشرة. وقد قامت شركة أرامكو السعودية بإعادة حفر أكبر حقولها، وهو حقل الغوار، بطريقة الحفر المائل.

ـ لا تستخدم لقم الحفر «الماسية المدمجة» قاطعات مدحرجة. وتبرز من قاعدة اللقمة نتوءات قوية ذات أوجه من حبيبات ناعمة من الماس الصناعي ملصقة سوية بكاربيد التنكستن. وتقوم لقمة حفر ماسية مدمجة واحدة أحياناً بحفر بئر لعمق سبعة الآف قدم موفرة تكاليف سحب أنبوب الحفر لتبديل اللقمة. وقد نشرت مجموعة يابانية سنة 2003 تقنية لصنع مدمجات ماسية ناعمة الحبيبة يجري تثبيتها بالماس. والمادة اليابانية الجديدة أمتن وتقاوم الحرارة بصورة أفضل من المواد الاعتيادية للقم الحفر(7).

ـ قامت شركة بوينغ مؤخراً بالتبرع بستة براءات اختراع لليزرات عالية الطاقة، وهي من بقايا برنامج حرب النجوم لمدرسة التعدين في كولورادو. وهناك أمل لتطوير طريقة سريعة لحفر آبار النفط .

ـ تمتلك أبراج الحفر ذات الأنابيب الملفوفة بكرة قطرها نحو ثلاثين قدماً. ويجري في هذا البرج لف أنبوب الحفر المتواصل على البكرة الكبيرة مثل خيط صيد السمك. ويمكن تناول أنابيب ذات قطر يصل إلى ثلاثة إنشات ونصف بهذه الطريقة إذا ما كانت البكرة كبيرة بما فيه الكفاية. وتقوم معامل الأنابيب بصنع أنابيب مستدقة يزداد سمك الجدار فيها من القاعدة إلى قمة البئر. ويذهب بي خيالي إلى تصور أن العملية كلها سيجري التحكم بها من برج مكتبي في هيوستن. وستتألف مجموعة الحفر في الموقع من حفار وكلب. ومهمة الحفار هناك هي إطعام الكلب. إما الكلب فهو هناك ليعض الحفار إذا ما لمس أي شيء.

وكما سنرى عما قريب، فإن تقنية جديدة أو محسّنة للحفر لن تصل إلى السوق في وقت مناسب لتنقذنا من شحة نفطية في هذا

---

(7) انـظـر : T. Irifune [et al.], «Ultrahard Polycrystalline Diamond from Graphite,» *Nature*, vol. 421 (2003), pp. 599-600.

العقد. لكن الشهرة والثروة على أي حال قد يكونان من نصيب من ينجح في تطوير طريقة جديدة أكثر اقتصادية للحفر. راجع الكتاب الذي نشر سنة 1968 تحت عنوان (*Novel Drilling Techniques*) لتتجنب إعادة اختراع إطار العجلة[8].

أساليب الإنتاج

تتدفق آبار النفط الكبرى في بداياتها ذاتياً، فالنفط يصل إلى السطح، لأن الضغط الذي يولده عمود من الرغوة ـ غاز طبيعي ونفط ـ داخل الأنبوب هو أقل من الضغط في صخر المكمن. (أما النفط المنبجس من قمة برج الحفر فلم يعد مألوفاً منذ مائة سنة). وكلما استمر الإنتاج هبط ضغط المكمن وبدأت المضخات المعهودة المنكسة الرأس بالعمل لرفع النفط إلى السطح.

وكان الإنتاج الأولي في ممارسات الحقول النفطية المبكرة يستمر حتى يهبط إنتاج الآبار في الحقل إلى الحد الذي لا يغطي التكاليف. عند ذلك، كان الوقت ملائماً للبدء بعمليات الاستخلاص الثانوي. وتتضمن هذه ضخ الماء في بعض الآبار واستخراج النفط من آبار أخرى، وهو ما يدعى الإغراق بالماء (Water Flood). وكان النفط الثانوي في بعض الحقول يساوي تقريباً مقدار النفط الأولي[*].

يمكن إجراء تقديرات جيدة لمقدار النفط الكلي الموجود في المكمن قبل بدء الإنتاج. وليس ذلك عملاً تخمينياً، فسجلات الآبار المستحصلة من المتحسسات في قعر البئر تعطي مقاساً للمسامية

---

(8) انظر: William Maurer, *Novel Drilling Techniques* (Oxford: Pergamon Press, 1968).

(*) لا بل قد يزيد عن النفط الأولي أضعافاً مضاعفة في بعض الحالات، فبعض الحقول غزيرة الإنتاج لكن ضغط المكمن قليل جداً، مما يستدعي إنشاء منظومة استخلاص ثانوي في مراحل مبكرة من عمر الحقل.

والسماكة ونسبة النفط في كل بئر. ويتم دمج القراءات من كافة الآبار في الحقل آخذين كل بئر كنموذج لمنطقة، وذلك لاحتساب النفط الكلي في موضعه أصلاً. والأخبار السيئة هي: أن أسلوب الإنتاج الأولي لا يستخلص إلا أقل من ربع النفط الأصلي. وبعد الاستخلاص الثانوي يكون نصف النفط لا يزال تقريباً في المكمن تحت الأرض. والأمل الذي يصاحبنا منذ زمن طويل هو استخلاص النصف الثاني هذا. لكن النفط المتبقي بعد الإغراق بالماء ينعزل لسوء الحظ في قطرات منفصلة في الصخر المكمني حتى أن إغراقاً مائياً سريعاً لن يستخلص كميات إضافية من النفط. أما في الممارسة الحديثة فيبدأ الإغراق المائي فيها مبكراً، وقد يكون في بعض الحالات مع بدء إنتاج الحقل.

وقد انبثقت مشاريع الاستخلاص المعزز (Enhanced Recovery) وبخاصة في أوائل الثمانينيات، مثل القصب بعد مطر الربيع. وقد استهل العمل الإغراق بالمنظفات (Detergent Floods) والإغراق بالنار (Fire Floods) والإغراق بالنايتروجين (Nitrogen Floods) والإغراق بالبوليمر (Polymer Floods) والإغراق بالمذيبات (Solvent Floods) والإغراق بالبخار (Steam Floods) والإغراق بثاني أوكسيد الكاربون (Cabondioxide Floods). والأخبار السيئة الإضافية هي أن ثلثي مشاريع الإنتاج المعزز توقفت عن العمل بسبب الكلف العالية، وبسبب انخفاض سعر النفط. ومع ذلك فإن بعضاً من قائمة التقنيات الممكنة كانت ناجحة. تنتج الولايات المتحدة اليوم 750000 برميل من النفط يومياً من مشاريع الاستخلاص المعزز[9]. والفائز الأكبر من هذه العمليات هو حقن ثاني أوكسيد الكاربون. ورغم أن ثاني أوكسيد الكاربون يذوب في الماء (أمثلة ذلك: سلتزر (Seltzer)، وبيرة

(9) انظر: Guntis Moritis, «Future of EOR and IOR,» *Oil and Gas Journal,* vol. 99 (14 May 2001), pp. 68-73.

الجذور (Root Beer)، وماء بيرييه (Perrier))، إلا أنه أكثر ذوباناً في النفط الخام. ويقوم ثاني أوكسيد الكاربون بتعظيم حجم قطرات النفط التي تبدأ بالتحرك ثانيةً. وبعد أن يصل النفط إلى سطح الأرض يصار إلى نزع ثاني أوكسيد الكاربون وإرساله إلى القعر ثانية ليصطاد كمية أخرى من النفط. إن حرق بعض أنواع الوقود وبخاصة الفحم الحجري يولد ثاني أوكسيد الكاربون. وأحد الأهداف البيئية الكبرى هي دفن ثاني أوكسيد الكاربون لتجنب الاحترار الكوني، لذا فإن بناء محطة توليد كهرباء تحرق الفحم قرب حقل نفطي يحتاج إلى ثاني أوكسيد الكربون قد تكون خطة ناجحة. ويجري الآن نقل ثاني أوكسيد الكاربون من مصدر طبيعي في جنوب غرب كولورادو بواسطة خط أنابيب لمئات الأميال إلى حقل نفطي في غرب تكساس.

إني أتوقع أن النصف المتبقي من النفط في معظم المكامن لن يكون قابلاً للاستخلاص بطريقة مجدية اقتصادياً حتى مع أسعار النفط المرتفعة. لقد كُرّس كمٌّ كبير من البراعة والوقت والمال لمشاريع الاستخلاص المعزز. وهذا لا يعني أن علينا التوقف عن التفكير بالاستخلاص المعزز وعن تجربة الأفكار الجيدة، ما نعنيه أننا لا يجب أن نعتمد على النفط المتبقي لعقد قادم على الأقل. وقد لا يكون في الحقيقة ممكناً استخلاصه بأي صورة.

إن جزءاً من سبب كون الصناعة النفطية صناعة ناضجة قادم من إعادة استثمار جزء كبير من الأرباح عبر السنين الخمسين الماضية. وقد كرست شركات النفط والخدمات النفطية الكبرى على المستوى العالمي مبالغ تربو على المليار دولار سنوياً على البحوث. وكانت ميزانية مختبرات شل للبحوث في هيوستن سنة 1960 تتجاوز الميزانية الكلية لمعهد كاليفورنيا للتكنولوجيا. وتم تطوير تقنيات حديثة مثيرة للإعجاب بحق وتساعد مردودات تلك البحوث على إمداد صناعة

النفط اليوم بأسباب النجاح. وهناك جانب معتم: لقد تم اختراع عدد من إطارات العجلات حتى يومنا هذا، ولن يكون من السهل أن يتم ولوج هذا الباب في مثل هذا الوقت المتأخر بكلفة هينة لتوليد ابتكارات رئيسية جديدة.

منظور هابرت

يعتبر معظمنا، ممن يتوقعون هبوطاً قريباً في إنتاج النفط في العالم، أن م. كينغ هابرت (M. King Hubbert) (1903-1989) قديسنا الشفيع. ليس سبب هذا تمتعه بطباع قدسية، فهو عالم كان يصعب التماشي معه. ألّف هابرت نصف دزينة من الورقات العلمية ذات أهمية رئيسية في الجيولوجيا. لكن شهرته تستند إلى توقعه المثير للجدل الذي أعلنه سنة 1956 حول وصول إنتاج النفط في الولايات المتحدة ذروته في أوائل السبعينيات، وقد بدأ فعلاً بالهبوط إثر ذلك. وبعد تحقق توقعاته، تبنت حركة الحفاظ على الموارد الطبيعية هابرت كأسطورة في زمنه. نشأ م. كينغ هابرت في بلدة تدعى سان سابا في وسط تكساس. وحصل على شهادات البكالوريوس والماجستير والدكتوراه من جامعة شيكاغو. وكان يحمل لسبع سنين سبقت الحرب العالمية الثانية درجة محاضر في جامعة كولومبيا دون أن يحصل على أدنى درجات الأستاذية.

عمل هابرت أثناء الحرب في مجلس الإنتاج الحربي، ثم قضى ثلاثين سنة في مختبرات شل للبحوث في هيوستن، وبعد تقاعده من شل درّس في ستانفورد وفي بيركلي وعمل لهيئة المسح الجيولوجي في الولايات المتحدة. وهناك ارتباك دائم حول ما يجب أن ندعو به هابرت: هل هو جيولوجي أو جيوفيزيائي أو مهندس مكامن نفطية؟ وكل ذلك صحيح لكن ذلك ليس بالشيء المهم.

وكانت علاقتي مع هابرت قد بدأت لحسن الحظ على أحسن ما يرام، فقبل أن ألتحق بمختبر شل للبحوث في سنة 1958 كنت طالب دراسات عليا في برنستون. وكان رئيس قسم الجيولوجيا في برنستون، هاري هيس، عضواً في أكاديمية العلوم الوطنية مع هابرت. وبعد أن انتقلت إلى هيوستن كان هيس يسأل هابرت عمّا إذا كان قد قابل ديفيس. وبقي هابرت يجيب بالنفي. وأخيراً قام هابرت بمخابرة دائرتي وسأل عن إمكانية الذهاب إلى مكتبة لإجراء محادثة. عند ذلك أدرك هابرت مع بعض الارتباك أننا قد تشاركنا منذ أكثر من سنة في نفس مائدة الطعام في بعض الأحيان في مطعم المختبرات. وكان اسم عائلتي صعب التهجئة بحيث لم يحفظه هابرت وكان (كين) و(ديفيس) بالنسبة له نفس الشخص. وأصبح بعد ذلك صديقاً حميماً طوال حياته.

كان يتملكني شعور كلما أمسك هابرت بقطعة من الطباشير ليوضح مسألة في الفيزياء بأن الرياضيات لم تكن بالنسبة له موضوعاً متمكناً منه دون أي جهد. ويمتلك بعض العلميين والرياضيين ملكة خارقة لحل المسائل الرياضية الصعبة بسرعة وبأقل قدر من الجهد كما يبدو. لكن تلك الملكة لم تكن موزعة بالتساوي على أي حال. ومن الأمثلة على أعلى المستويات قيام إينشتاين خلال السنين التي قضاها يتلمس طريقه خلال المعادلات الرياضية لنظرية النسبية العامة، بطلب العون والحصول عليه من صديق له مختص بالرياضيات[10]. وأنا في قعر صنف البطيئين جداً في الرياضيات لكني أشعر بتحسن عندما أعي أن العمل الشاق مطلوب حتى من علماء ذوي مستوى عال.

---

(10) انظر: Abraham Pais, «*Subtle is the Lord...*»: *The Science and the Life of Albert Einstein* (Oxford; New York: Oxford University Press, 1982), pp. 216-221.

هناك سؤالان يتعلقان بتوقع هابرت في سنة 1956 حول ذروة الإنتاج النفطي في الولايات المتحدة: هل كان بالإمكان القيام بتوقع صحيح قبل ذلك التاريخ؟ وهل استبق هابرت إطلاقة البدء وقام بنشر تخمين حالفه فيه الحظ قبل تجميع كمٍ كافٍ من المعلومات التي تسوغ إعطاء توقع؟

أرسلت لي إليزابت وود (Elizabeth Wood) وهي عالمة بلورات مرموقة (متقاعدة الآن) رسالة تقول فيها إنها عرفت هابرت في جامعة كولومبيا منذ 1932 و لغاية 1935، وتقول إنه كان مهتماً حتى آنذاك في الحدود الممكنة لتجهيز النفط، فهل راقب هابرت الوضع لعشرين سنة ثم انقضّ ما أن أصبحت المعلومات ذات رصانة كافية؟

وقمت في محاولتي للحصول على إجابة لهذه الأسئلة بتلقيم المعلومات التاريخية سنة بعد سنة في برنامج على الحاسوب يستخدم معادلات هابرت. وقام الحاسوب بالنظر خلفياً إلى كل السنين السابقة وأعطى توقعاً شبيهاً بتوقع هابرت في نوع من الاختبار للنموذج الرياضي. وكانت التوقعات منذ سنة 1900 ولغاية 1933 مبعثرة بصورة واسعة، وحتى أن بعضها أعطت مقادير سلبية من النفط، ولم تستقر التوقعات حتى تجاوزنا سنة 1958. وقد نجح هابرت حسب ما أتصور سنة 1956 بمزيج من التحليل الفعلي للمعلومات والحدس البارع والحظ الجيد. ومع مرور الزمن تحسنت المعلومات وكذلك طريقة هابرت. ولم يحتج بعد سنة 1963 على وجه التخصيص إلى وضع تخمينات مدروسة حول المقدار الكلي للنفط في الولايات المتحدة.

إن الأسس المنطقية التي ابتنيت عليها تقنية هابرت موضحة في الفصل التالي. وقد قام بعض من تبعوه بتطوير أسلوب رياضي بديل

لمعالجة الموضوع[11]. أما أنا فقد اخترت طريق الجبناء: ابق قريباً جداً من نماذج هابرت المتأخرة، فالذي كان صحيحاً للولايات المتحدة سنة 1963 يمتلك أفضل فرصة لإعطاء التوقع الصحيح للعالم سنة 2005.

وما الذي تعرفه شركات النفط الكبرى؟ إنها ملاعبهم الخاصة، وباستطاعتهم استخدام كل الاقتصاديين الذين يحتاجونهم. ومن الواضح أنهم لا يقولون الكثير علناً(*). ويبدو أن أكسون موبيل وشفرون تكساكو يتخذون موقفا يقول إن ـ العمل ـ كالمعتاد.

أما بي بي/ أموكو (BP/Amoco)، فتستخدم «ما بعد النفط» كشعار، كاملاً مع وردة ربيع خضراء كرمز لها. لكن أفعال بي بي على أي حال تبدو مركزة بصورة كبيرة على إنتاج النفط وعلى بيع البنزين. (وقد كان لدي إغراء شديد لتسمية هذا الكتاب Beyond (Petroleum، آملا أن توفر لي شركة BP بعض الدعاية المجانية من خلال إقامة دعوى قانونية ضدي). أما شركة رويال دتش/ شل، فقد أعلنت أنها تستثمر بضعة مليارات من الدولارات في مشاريع طاقة الريح والطاقة الشمسية. وقامت في ربيع سنة 2003 بافتتاح محطة تجهيز بالهيدروجين في أيسلندا، وعملية رئيسية لتعدين الرمال القيرية

(11) انظر على سبيل المثال: Jean Laherrère, «World Oil Supply-What Goes Up Must Come Down, But When Will It Peak?,» *Oil and Gas Journal*, vol. 97 (1 February 2001), pp. 57-64.

(*) الكل يعرف، ذلك عن سرية الشركات النفطية. وعلى سبيل المثال أخبرني صديق في ربيع سنة 1972 وكان يعمل آنذاك في مختبرات بحوث شركة BP البريطانية للنفط أنهم صرفوا وقتاً وجهداً كبيرين لتقييم لاحتمالات النفطية في كافة أقطار العالم بغض النظر عن كونها مكتشفة أو غير مكتشفة وأن الدراسة وضعت العراق في المرتبة الأولى، وهذه المعلومة لم تكشف علناً حتى اليوم بعد نحو أربع عقود.

في ألبرتا. وتدرك شركة توتال (التي كانت تعرف سابقاً بتوتال/ فينا/ إلف (Total/Fina/Elf)) بجدية قضية ذروة الإنتاج العالمي المتوقعة للنفط. لكن الذي لا نراه هو قيام الشركات الكبرى بشراء الشركات الأصغر بصورة مسعورة للاستحواذ على ما تبقى من احتياطاتها النفطية. وما يحدث في الحقيقة هو العكس، فالشركات الكبرى تبيع حقولها المنضَّبة جزئياً إلى شركات مستقلة صغرى.

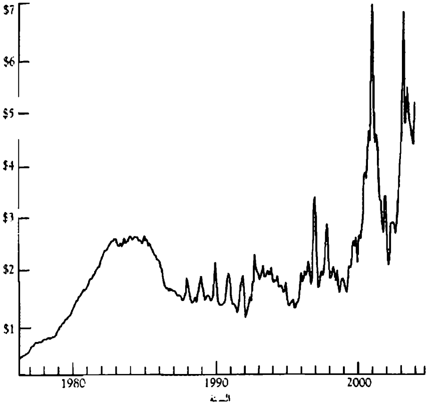
وهناك قائمة طويلة من الأعذار من معجزات ينتظر وقوعها تُعرض لتبين أن تحليلات هابرت كانت مخطوءة أو غير مكتملة أو مضللة أو غير مرحب بها، إذ يقال إن تجميعة (combination) تشمل الوصول إلى مناطق كانت مغلقة سابقاً، وانبعاث النشاط في روسيا وصولاً إلى التوفر الكبير للتقنيات الجديدة، سيبطلان معادلات هابرت. وما يقابل هذه الابتكارات المرغوب بها بإخلاص هو بعض التطورات المؤكدة في الاتجاه العكسي. وعلى سبيل المثال فقد قامت أرامكو السعودية بإعادة حفر الآبار في حقل الغوار، وهو أكبر حقل نفطي في العالم بطريقة الحفر الأفقي، وذلك لتحسين كل من حقن الماء واستخلاص النفط. وقد كانت خطتهم ناجحة. ومع ذلك فعندما يصل مستوى الماء إلى مستوى هذه الآبار الأفقية للاستخلاص سيكون هنالك هبوط حاد في الإنتاج. ويزود حقل الغوار السعودية بنصف إنتاجها تقريباً، وربما سيكون هناك عبر سنين قليلة افتقادٌ لبضعة ملايين برميل من الإنتاج يومياً. وربما يكون ذلك قد بدأ الآن. ويقول أحد التقارير إن الآبار المنتجة تعطي مع النفط مليون برميل من الماء يومياً. وهذا ليس بانتقاد لأرامكو السعودية، إذ إنهم فعلوا عين الصواب، فالآبار الأفقية الكفوءة التي تعتصر آخر قطرة من النفط الذي يمكن إنتاجه ستُعْلِمك، إنما بصورة فجائية، عندما تكون آخر قطرة من النفط قد أنتجت.

سرعة تأثر الأسعار

يعتقد بعض الجيولوجيين ويعرف كافة الاقتصاديين أن ندرة النفط سينتج عنها توازن جديد للأسعار سيوازن بين بحث معزز عن النفط مقابل احتياجات المستهلكين. وهناك رأي بديل يقول بأننا سنلاقي تقلباً هائلاً في الأسعار. وقد جاء التفسير الجديد نتيجة لإحدى محاضراتي، فقد وكزت سوزي زاكس (Suzy Sachs) في اليوم التالي زوجها الغافي وقالت له: «إن واحدة من معادلات كين مقلوبة رأساً على عقب». لكن ظهر أن المعادلة كانت بوضع صحيح قدر تعلق الأمر بغرضي لكنها عرفت الصيغة المعكوسة من نظرية الاصطفاف (Queueing Theory). وكل ما كنت أعرفه عن كلمة «اصطفاف» (Queueing)، هو أنها كلمة فيها خمس حروف علّة متتالية. أما سوزي، فقد كانت مهندسة نُظُم لشركة بيل سيستمز لعشرين عاماً. وشركة التلفونات تعرف ذلك، بسبب الاصطفاف. وهناك عدد من الترتيبات المختلفة للاصطفاف: الاصطفاف المفرد ـ الخدم المفرد (بائع الخضار)، والاصطفاف المفرد ـ تعدد الخدم (تسجيل تذاكر السفر في المطارات. . .) وهكذا. وبينت سوزي لي إن كل هذه الأنظمة تصبح متصفة بالفوضى عندما يقارب الحِمْل سعة النظام[12]، فالزبائن يصلون في أوقات عشوائية، ويقفز الوقت الذي يقضى في الانتظار في الاصطفاف من قصير جداً إلى طويل جداً. وأعطاني أحد أصدقائها خطاً بيانياً لأسعار الغاز في الولايات المتحدة. لقد كان المنحنى سلساً ومطرداً لغاية سنة 1985 ثم بدأ يتذبذب وبدأت الذبذبات تكبر. وقد تضاعف السعر عبر عطلة نهاية أسبوع واحدة خلال شتاء 2002 ـ 2003 البارد.

---

(12) انظر: Leonard Kleinrock, *Queueing Systems* (New York: Wiley, 1976).



اتبعت أسعار الغاز الطبيعي في الولايات المتحدة منحنى سلساً نسبياً حتى سنة 1987. وحدثت تذبذبات كبيرة ومتزايدة بعد ذلك، وبخاصة في الشتاء. ويبين هذا الخط البياني أسعار شراء الغاز الأولية بعد البئر. وهناك أسعار أخرى أعلى على امتداد شبكة توزيع الغاز.

كان الهدف من تأسيس أوبك هو الحد من تقلبات الأسعار. وتقوم أوبك بمراقبة «سلة أسعار سوقية» لسبعة أنواع من النفوط ذوات درجات مختلفة. وكان هدف أوبك اعتباراً من 1983 لغاية 2002 هو تنظيم الإنتاج للحفاظ على سعر برميل النفط بين 22 و28 دولاراً (كان ذلك غير قانوني، و«مؤامرة لتقييد التجارة»، لو كان يطبق في الولايات المتحدة)، فإذا ما هبط السعر دون 22 دولاراً فستقوم أوبك بخفض الإنتاج، وإذا ما زاد السعر عن 28 دولاراً فستقوم أوبك بإغراق السوق. وكانت أوبك منذ سنة 2002 تنتج أساساً في حدود قابليتها القصوى. وأعلنت أوبك في بداية 2004

عندما كان سعر البرميل يقارب 33 دولاراً بأنها ستخفض الإنتاج. والأخبار الجيدة هي أن أوبك ليست متحكمة في سعر النفط بعد الآن، أما الأخبار السيئة فهي أن لا أحد يتحكم به.

ويمكن أن يطلق المناخ غير العادي أو التوقفات الوقتية في التجهيز أو التأرجحات في الاقتصاد العالمي الانحرافات التي نراها في أسعار النفط. ويستخدم غالبية النفط كتجهيزات لقطاع النقل. والطلب على النفط على المقياس الزمني لا يتصف بالمرونة لمدد تقل عن ثلاث سنوات. أما على مقياس زمني أطول فمن الممكن استبدال السيارات بأساليب للنقل أكثر كفاءة، كما أننا نستطيع إعادة ترتيب فعالياتنا لكي تتطلب سفراً أقل. ويكره المديرون الغموض لكننا ننظر في كميات هائلة من الغموض في أسعار النفط. وسينطلق المؤمنون بالوفرة (cornucopians) عند أول تأرجح يؤدي إلى خفض السعر وفي نغمة واحدة قائلين بعدم وجود ذروة هابرت، لكن لا تصغ إليهم.

إن تهديد انخفاض الأسعار المستقبلي يمكن أن يعرقل المشاريع التي ستزيد الإنتاج الفعلي، فقد هبطت أسعار النفط خلال سنتي 1998 و1999 (مصححة للتضخم النقدي)[13] إلى مستويات لم تُر سابقاً إلا في أسوأ سني الكساد العظيم. إن منصة إنتاج بحرية والآبار المرتبطة بها، أو منجماً جديداً للرمال القيرية في ألبرتا، تعتبر استثمارات بعدة مليارات من الدولارات. ويتوقف مردود الاستثمار كلياً على سعر النفط المستقبلي. ومن الصعب التفكير بطريقة مقبولة سياسياً للتقليل من الغموض الذي يصاحب سعر النفط. ومن الممكن أن توافق الحكومة على تحمل فرق السعر إذا نقص عن 22 دولاراً

---

(13) إن تعبير (مصححة للتضخم النقدي) ربما يتضمن استنتاجاً دائرياً، فقد تعلمنا (بطريقة صعبة) خلال السبعينيات أن كلفة الطاقة تشكل عاملاً مهماً من عوامل التضخم.

للبرميل، على أساس أن تعيد الشركات ما يتحقق من نقد إضافي عندما يرتفع السعر عن 28 دولاراً للبرميل. وهناك حاجة لبعض الابتكارية هنا: **أولاً** لجعل النظام عادلاً، **وثانياً** لتوكيد كونه مقاوماً لسوء التصرف. أن إينرون(*) واحدة كافية.

المؤمنون بالوفرة

إن الشرح الذي نقدمه في الفصل التالي للتقنية التي يستخدمها هابرت تهدف إلى أن تكون مفهومة حتى من قبل المؤمنين بالوفرة. إن الفرضية الأساسية هي أن احتمالية العثور على النفط تعتمد بشدة على الجزء غير المكتشف من النفط، وأن لا شيء سوى ذلك يمتلك أهمية تذكر، ويمكن بالطبع إنشاء نموذج «أفضل» وأكثر تفصيلاً من خلال شموله لسعر النفط. لكن لو عرفتُ ما ستكون عليه أسعار النفط في السنتين القادمتين، لكنت سأصبح ذا غناء فاحش من خلال المتاجرة بأسواق النفط المستقبلية، ولن يكون عنيّ تأليف كتاب أو إعطاء محاضرات.

إن إعداد قائمة بالهدايا التي يجب أن يجلبها (بابا نويل) إلى الصناعة النفطية لن يساعد، فآخر مشروعين تطويرين للرمال القيرية في ألبرتا قد جُمد العمل بهما، ومعظم طرق الاستخلاص المعزز التي بدأ العمل بها في الثمانينيات لا تستخدم الآن، ويحتاج تصنيع الإيثانول من الذرة إعانات طائلة من الحكومة، وقد اقتطع النصف من ميزانيات بحوث الشركات. من الصعب ربط مستقبلك بقائمة تمنيات.

(*) إينرون: واحدة من كبريات الشركات في الولايات المتحدة، ومختصة ببناء المصانع ومحطات القوة الكهربائية: أعلن إفلاسها سنة 2001 نتيجة الاحتيال.

وقد أفاد بعض الاقتصاديين أن الركود الذي ساد بين سنتي 2001 و2003 لم يشبه أي ركود سابق. ويركز معظمهم على انفجار فقاعة دوت. كوم. ولم يلحظ غالبيتهم أن إنتاج النفط استقر في حدود سنة 1998، وسيبدأ الإنتاج عما قريب بهبوط دائم وربما سيجلب ذلك اهتمامهم.

الفصل الثالث

طريقة هابرت

تضمنت تقنية م. كينغ هابرت في هيئتها الأصلية بعض الرياضيات الجدية. وكان العديد من المحللين يشكّون في وجود شيء ما مخفي وراء الستارة الرياضية. كان مايكل لينش (Michael Lynch) قد كتب «إن هذا العمل كان، لعدد من الأسباب، غير قابل للفهم من قبل العديد من المراقبين. ويبدو أن ذلك أعاره صفة إضافية مميزة»[1]. ويحتوي هذا الفصل اشتقاقاً جديداً لا يستخدم إلا أبسط بدايات الجبر ويصل إلى نتائج مطابقة لنتائج هابرت. وإذا كنت تكره الرياضيات بصورة مطلقة، فبإمكانك ترك هذا الفصل. ومع ذلك، فإنه فرصة سهلة للالتحاق بذلك النادي الحصري من الأشخاص الذي يفهمون هابرت فعلاً.

ومنهجية هابرت حتى في زمننا هذا لا تزال غير مفهومة، وعلى مدى واسع. لقد ساهم هابرت ذاته، وعن غير قصد، في ذلك

---

(1) انـظـر: Michael Lynch, «Petroleum Resources Pessimism Debunked in Hubbert Model and Hubbert Modeler's Assessment,» *Oil and Gas Journal*, vol. 101 (14 July 2003), pp. 38-47.

الإرباك، فقد كانت أوراقه العلمية المبكرة عن النفط تتصف بنكهة «خذها ـ أو ـ دعها»، ولم يقم حتى سنة 1982 ـ عندما بلغ التاسعة والسبعين من عمره (وهو ما أدعوه الآن «منتصف العمر المهني») ـ بنشر الأسباب التي دعته لتفضيل معادلات رياضية معينة[2]. كانت الورقة التي قدمها سنة 1982 إنتاجاً صرفاً لهابرت، فهو لا يعطي أي تلميح حول ما إذا كان يعرف التوضيح الذي أعطاه آنذاك طوال الوقت أم أنه كان قد اشتقه في وقت لاحق. ولا يشير هابرت أبداً كذلك إلى أن الطريقة التي تعتمد الخطوط البيانية التي وضحها كانت مستخدمة لبضع سنين خلت من قبل بايولوجيي الجماعات[3] (Population Biologists).

وبعد أن شققت طريقي كادحاً (وببطء) خلال 150 صفحة من ورقته لسنة 1982، فهمت أخيراً ما كان هابرت قد فعله. ولكوني بطيء الفهم جداً مع الرياضيات، بدأت العمل على اشتقاق كان مماثلاً بالضبط لما فعله هابرت إنما بطريقة أقل مباهاة وروعة. وما سيلي لا يمثل خدعة، فما من شيء تُرك إذا ما كان ضمن منهجية هابرت. وسنستخدم تاريخ إنتاج النفط في أميركا كمجموعة معلومات للاختبار. ويحتمل أن تكون الولايات المتحدة المنطقة التي كانت كثافة الاستكشاف فيها على أشدها في العالم أجمع، ففيها أكبر عدد من الآبار المنتجة والفعالة، وهو 520000 بئر (مقارنة بالصين وهي الثانية وفيها 72000 بئر).

---

(2) انظر: M. King Hubbert, «Techniques of Prediction as Applied to the Production of Oil and Gas,» in: Saul I. Gass, *Oil and Gas Supply Modeling*, NBS Special Publication; vol. 631 (Washington, D. C.: National Bureau of Standards, 1982), pp. 16-141.

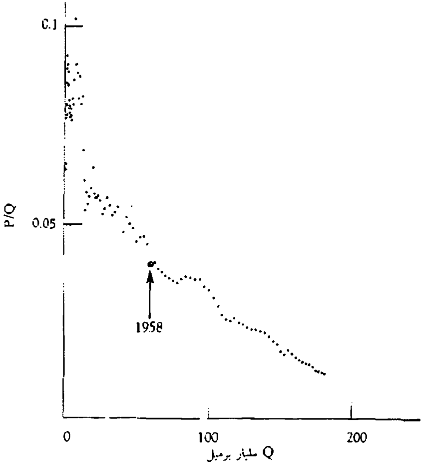
(3) انظر: Frederick E. Smith, «Population Growth in Daphnia Magna and a New Model for Population Growth,» *Ecology*, vol. 44 (1963), pp. 651-653.

ولما كنا نريد تقييم الاتجاهات المستقبلية المحتملة فلا شيء يبز في ذلك خطاً مستقيماً على مخطط بياني. وهناك عدد من الأشياء التي قد نختارها لإحداثيات المخطط. وأبسط الخيارات التي أعرفها، والذي استخدمه هابرت سنة 1982، يحدد الإنتاج المتراكم على المحور الأفقي ويحدد نسبة الإنتاج السنوي إلى الإنتاج المتراكم على المحور العمودي. ويستقر الخط البياني لتاريخ الإنتاج في الولايات المتحدة إلى خط مستقيم جيد بعد سنة 1958. ولأن الإنتاج المتراكم يزداد دوماً مع الزمن، لذا فإن الزمن يزداد من اليسار إلى اليمين عبرالمخطط البياني. وسيتبين لاحقاً أن النقاط المبكرة في الزاوية العليا اليسرى للمخطط أخذت هذا الموقع، ليس لأن كمية الإنتاج كانت أكثر مما هي عليه خلال فترة 1958 - 2003، بل لأن كمية الإنتاج المتراكم (أي المقام في هذا الاحتساب) كان صغيراً.

ونريد الآن أنا وحاسوبي أن نجد أفضل خط مستقيم يتلائم مع النقاط من سنة 1958 وحتى سنة 2003. وأود أن أحذركم أنكم ما أن تسمحوا لي برسم هذا الخط المستقيم حتى تكونوا قد استدعيتم قصة هابرت بكل حذافيرها. ولن تكون بقية هذا التحليل أكثر من معاينة لمدلولات هذا الخط المستقيم.

والشيء الأول الذي نلحظه هو أن الموقع الذي يقطع فيه هذا الخط المستقيم المحور الأفقي هو عند نقطة 228 مليار برميل. وهذا من ناحية ليس إلا عدداً يصف الموقع اللحظوي للخط. أما حسب تفسير هابرت، فإن ذلك التقاطع هو كمية النفط المتوقع استخلاصها من الولايات المتحدة عندما تنشف آخر بئر منتجة. دعنا نسمي هذه النقطة (Q_t) لمجموع المتراكم. وقد قدرت إدارة المسح الجيولوجي للولايات المتحدة سنة 2000 كمية الإنتاج المتراكم المتوقع، خلافاً

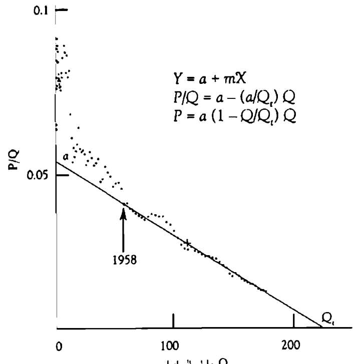
لتقدير هابرت، بـ 362 مليار برميل[4]. وإما أن يقوم هذا الخط المستقيم بانحناءة غير متوقعة، أو أن هذه الإدارة كانت تعتمد على جلب العراق إلى الاتحاد كالولاية الحادية والخمسين.



يستخدم علماء أحياء الجماعات تقليدياً مخططات بيانية بهذه الهيئة لاختبار النفط. وتمثل كل نقطة إنتاج سنة واحدة من النفط في الولايات المتحدة. ويمثل المحور الأفقي الإنتاج المتراكم (Q) منذ سنة 1859 لغاية سنة محددة. أما المحور العمودي فيمثل الإنتاج في سنة محددة (P) مقسوماً على الإنتاج المتراكم لغاية تلك السنة أي (P/Q). ويبدو أن النقاط من سنة 1958 فصاعداً تقع كلها على خط مستقيم تقريباً. والعديد من النقاط فيما سبق 1958 تقع فوق امتداد الخط. وليس سبب ذلك أن الإنتاج كان كبيراً جداً بل لأنه حدث في وقت مبكر، فحين تكون Q صغيرة تصبح P/Q كبيرة.

---

(4) انظر: USGS World Energy Assessment Team, *World Petroleum Assessment 2000* ([Reston, VA]: U. S. Dept. of the Interior, U. S. Geological Survey, 2000).



تم في هذا الشكل رسم الخط المستقيم الذي يلائم المعلومات من سنة 1958 لغاية 2003 بأحسن صورة. وتتبع نظرية هابرت بمجملها رسم هذا الخط المستقيم. ولا من حاجة لأي افتراضات أو تخمينات أخرى. وهذا الخط هو نظرية هابرت. والنقطة التي يقطع فيها الخط المحور العمودي (والنقطة تدعى a) هي مثال للبداية حينما كان الإنتاج التراكم للولايات المتحدة يساوي صفر. ويصل الخط المستقيم إلى المحور الأفقي عند النقطة (Q_t) حين يهبط الإنتاج السنوي P إلى الصفر. والمعادلة العليا ليست إلا معادلة الخط المستقيم حيث أن y هو المحور العمودي في المخطط وx هو المحور الأفقي. أما الرمز a فهو قيمة y عندما تكون x تساوي صفر بينما تمثل m ميل الخط المستقيم. والمعادلة الوسطى هي ببساطة إعادة كتابة حيث نقوم بوضع الرموز من المخطط البياني. وتصبح y فيها P/Q بينما x تصبح Q وتحتفظ a بنفس المعنى ويصبح ميل الخط a/Q_t. وهناك إشارة ناقص في وسط المعادلة وسببها أن Y تتناقص عندما تزداد x. وعند ضرب طرفي المعادلة الوسطى بـ Q نحصل على المعادلة في الخط السفلي. وهذا تمثيل جبري لمعادلة هابرت. والمفهوم الأساسي هو ما في داخل الأقواس الذي يمكن كتابته كالتالي ($1- Q/Q_t$) أو ما يعادله $(Q_t-Q)/Q_t$. وفي الصيغتين كلتيهما يمثل هذا المقدار الجزء من الكمية الكلية للنفط الباقية لتستخرج. وتمثل المعادلة السفلية خطاً منحنياً بشكل ناقوس أو منحنى «ذو دلالة رمزية». وتقع ذروة درجة الإنتاج عندما يكون نصف النفط قد أنتج. وتؤشر علامة (+) على الخط البياني نقطة المنتصف هذه.

أما تقاطع الخط مع المحور العمودي والذي سندعوه (a)، فهو نوع من نسبة الفائدة، وهو الإنتاج السنوي معبَّراً عنه كجزء من الإنتاج المتراكم. وتعطي هذه النقطة على مخطط إنتاج الولايات المتحدة القيمة 0,0536 وهي ما تساوي 5,36٪ سنوياً.

ونجد داخل الأقواس في المعادلة السفلى سحر هابرت الخطير، فـ Q/Q_t يمثل الجزء من النفط الكلي الذي تم إنتاجه، أما $(1 - Q/Q_t)$ فهو الجزء الذي ينتظر الإنتاج. وتقول المعادلة إن قدرتنا على إنتاج p تعتمد بصورة خطية على الجزء المتبقي من النفط. وعندما حفر دريك بئره الأولى كانت Q تساوي صفراً، وكان الحد داخل الأقواس يساوي 1. وعند النهاية تصبح Q تساوي Q_t، ويكون 1-1 = 0، فلا تقوم بإنتاج النفط بعد ذلك. وتنحدر نسبة الإنتاج عبر خط مستقيم من 0 الى 1. وسنقوم فيما بعد باستخدام ذات المعادلة للبحث عن النفط والعثور عليه. والفكرة موضوعة الاختبار هي في ما إذا كان الجزء غير المكتشف من النفط يتحكم في القدرة على العثور على النفط، فسهولة صيد السمك تعتمد في الغالب على عدد السمك المتبقي في الحوض.

وعندما يكون الحد داخل الأقواس يساوي 1، أو إذا أخذ الحد كله ـ ما داخل الأقواس وخارجها ـ جانباً، فإن المعادلة تصف نمو ربح مركب غير محدد (نمو أسّي أو لوغاريثمي). والنمو اللوغاريثمي غير المحدد يدفئ قلوب المؤمنين بالوفرة. وينحسر النقاش بين المؤمنين بالوفرة وبين أتباع هابرت بمجمله إلى ما في داخل هذه الأقواس.

ويقول تقليد راسخ الأسس في العلوم يعود إلى ما قبل سنة 1350 بتجربة أبسط الفرضيات أولاً (وهذا ما يدعى بشفرة أوكام)[*]،

(*) تقول هذه القاعدة التي تعزى إلى الراهب الإنجليزي وليام الأوكامي (William of Occam) الذي عاش في القرن الرابع عشر. وأبسط تعبير عن هذه القاعدة بقول (إذا تساوت كل المعطيات فإن أبسط الحلول هو أفضلها).

فإذا ما كان الحذاء ملائماً البسه. ولا من داعٍ لاختراع خطط معقدة إذا ما كان أبسط الشروح ملائماً، فالتسليم بأن قابليتنا على إنتاج النفط تعتمد بصورة كلية وبطريقة طردية (تناسب مباشر) مع الجزء غير المنتج هي أسهل فكرة يمكن اختبارها.

وتلائم هذه الفكرة المعلومات المتوفرة حول إنتاج الولايات المتحدة للفترة 1958 ـ 2003 بطريقة جيدة. والشيء الذي يثير المؤمنين بالوفرة هو ما تتضمنه فرضية هابرت بأن لا شيء عدا الجزء غير المنتج من النفط له أي أهمية، فما هو تأثير المسوح الزلزالية ثلاثية الأبعاد، والحفر العميق، والحفر في منطقة الملاذ الوطني للحياة البرية في المنطقة القطبية ـ (ANWR) واستخدام الحواسيب لإعداد صور التشكيلات الجيولوجية؟ وماذا عن ارتفاع أسعار النفط والغاز؟ إن م. كينغ هابرت ليس معنا ليجيب، لذا سأقول بدلاً عنه إن التقنيات المحسنة والحوافز كانت تَظهر طوال الوقت ولا يبدو أن هناك تحسناً فجائياً مثيراً سيضع انحناء فورياً في الخط المستقيم.

إننا نستطيع بسهولة أن نحتسب 1/P الذي سيكون عدد السنين لكل مليار برميل، فالولايات المتحدة كانت منذ سنة 1933 تنتج أكثر من مليار برميل في كل سنة، لذا، فإن 1/P لكل هذه السنين هي جزء من السنة. وسنقوم لكل مليار برميل من الإنتاج المتراكم Q باستخدام a (0,0536) وQ_t (228,4) لاحتساب الفترة الزمنية 1/P. وسنبقى كلما تقدمنا نضيف فترات الزمن لنحصل على الزمن الكلي. والمنحنى الذي سنحصل عليه سيكون ناقوسي الشكل.

وسيكون هذا المنحنى متماثلاً زمنياً، فالجهة المنحدرة هي صورة مرآة للجهة الصاعدة. وهذا ليس إلا نتيجة للاعتماد المباشر لنسبة الإنتاج على الجزء غير المنتج. ويدعى بالمنحنى اللوجستي (Logistic). لكن هذا يحتاج بعض التوضيح:

فكلمتا (Logistic) و(Logistics) اشتقتا من نفس المصدر، وهي الكلمة الإغريقية للاحتساب «Calculating».

والكلمة الثانية (logistics) ليست صيغة جمع للكلمة الاولى التي تعني تزويد الجيش بالمأوى والغذاء والنقل (والتي عليك لتحصل عليها احتساب العدد وكم يحتاجون وكم هي المدة). أما (Logistic) فتعني «المهارة في الاحتساب». وكان بيار فرانسوا فيرهلست (Pierre Francois Verhulst)، البنجيكي الذي طور المنحنى اللوجستي، ماهراً في الاحتساب.

والمساحة تحت هذا المنحنى هي Q_t وبسبب التماثل الزمني ستحدث سنة الذروة عندما تبلغ المساحة ضمن المنحني نصف Q_t. والحجم الأعظم للإنتاج خلال سنة الذروة تلك سيبلغ ($0.25aQ_t$). وسيهبط الإنتاج السنوي إلى نصف الحد الأعظم للإنتاج قبل وبعد 1.762/a سنة من سنة الذروة[5].

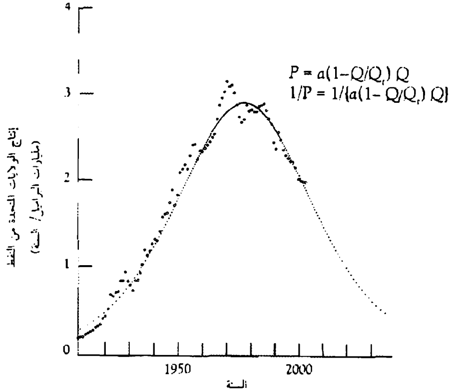
أرجو صبرَك لدقيقة فقط: إننا لم نقم بتسمية السنين على المنحني[6]، إننا لا نريد مطلقاً أن نتعامل مع نقطة البدء في المنحني اللوجستي، ولا توجد طريقة نعلم بها كم عدد براميل النفط التي غرفها أجدادي من سكان أميركا الأصليين قبل أن يحفر دريك أول آباره. والذي نفعله هو أن نختار من بين المعلومات المتوفرة سنة واحدة، أو سنة وجزء من السنة، لها علاقة بكمية من الإنتاج التراكمي يمثلها عدد صحيح، فعلى سبيل المثال، إن إنتاج الولايات المتحدة المتراكم بلغ 100 مليار برميل في 1972,1، عند ذلك نقوم

(5) لمن يبغون التجريد النظري، فإن: ((1,762 = log (3 + SQR(8)).

(6) الماهرون في لرياضيات سيلاحظون أننا نقوم بعمليات تكامل رقمية، وأن بقية هذا المقطع هي لتحديد ثابت التكامل (Integration Constant).

باحتساب 1/P من الوقت التجميعي بخطوات مقدار كل منها مليار برميل حتى نبلغ 100 مليار. نقوم عند تلك النقطة بتوقيت ساعتنا على 1972,1. نعود بعد ذلك إلى البداية ونبدأ بالاحتساب مرة ثانية، مدركين أن الإنتاج المتراكم سيمر في نقطة 100 مليار في 1972,1. وبإمكاننا الآن توليد منحنٍ يقارن إنتاج الولايات المتحدة الفعلي مع المنحني اللوجستي السلس. والنتيجة ليست سيئة في الحقيقة.

ويبلغ المنحني اللوجستي قمته سنة *1976*، لكن السنة التي حصل فيها أكبر إنتاج كانت سنة 1970. وسنرى بعد ذلك أن شيئاً ما شبيهاً بذلك قد يكون يحدث بالإنتاج العالمي: فهناك قمة ذات لوجستية سنة 2005 والسنة التي حدث فيها أكبر إنتاج هي سنة 2003. ولماذا تحدث الذروة في الإنتاج قبل الذروة على المنحني؟ إنها بالتأكيد لا يمكن أن تحدث بعد الذروة، لأن القابلية المتناقصة تُبقي الإنتاج واطئاً. وإذا ما كانت هذه الذروة ستحدث، فهي ستحدث قبل الذروة على المنحنى عندما يكون هناك سعة إنتاجية غير مستغلة.



دعونا نعود إلى الخط البياني الذي عرفناه وأحببناه: الإنتاج مقابل الزمن. والمعادلة العليا معادة هنا من المخطط السابق. خذ معكوس جانبي المعادلة والذي هو نفس ناتج قسمة 1 بواسطة جانبي المعادلة وذلك للحصول على المعادلة السفلى. ولدينا الآن سنوات لكل مليار برميل بدل من مليارات البراميل في السنة. ويستمر الحاسوب مضيفاً السنين وأجزاء السنين لكل مليار برميل. وكل نقطة صغيرة تمثل مليار برميل من الإنتاج وتتعلق بالخط المستقيم الأكثر ملائمة على الخط البياني السابق. أما الدوائر الصغيرة فتمثل التاريخ الحقيقي.

وأفضّل شخصياً تجنب عمل مناظرات وظيفية شديدة التقارب بين الأصول البايولوجية للمنحنى اللوجستي وبين ما استعاره هابرت. ومعادلة اللوجستية وهي من أكثر النواحي الأساسية معادلة جبرية تتلاءم جيداً مع تاريخ الإنتاج النفطي. ولو لم تكن تلائمه لما كنا نتكلم عنها. ونرى بسبب ملائمتها أن إمكانية سيادة الجزء غير المطور من الخزين النفطي تسود على كل العوامل الأخرى. وسعر النفط بالطبع له تأثير إلا أن تأثيره ليس بتلك الأهمية.

وبالنسبة للنموذج البايولوجي، تصور أرضاً خالية جرّفت لتكون

خالية ثم تبدأ تمتلئ بالأدغال. وتكون الأدغال متباعدة في البداية، وهي لا تتنافس مع بعضها على الموارد. وينمو عدد الأدغال مثل نمو الربح المركب. وعندما يزداد عدد الأدغال تصبح نسبة نمو الأدغال الجديدة معتمدة على توفر المجال غير المشغول من الأرض التي كانت خالية. وما أن تمتلئ الأرض بكاملها فسنبقى مع الأدغال لكن عدد النباتات سيبقى ثابتاً.

والنمو في الموقف البايولوجي هو عدد الولادات ناقصاً عدد الوفيات. وفي النظير النفطي لا يموت أي برميل للنفط. ورغم أن براميل النفط لا تلد أطفالاً، إلا أن الاكتشافات النفطية يكون لها نسل ذهني، فاكتشاف طبقة جديدة حاوية على النفط ـ سلسلة صخرية في ألبرتا مثلاً ـ يكون عادة سبباً في اكتشاف سلسلة من الاكتشافات الشبيهة. والتشابه في النموذجين هو:

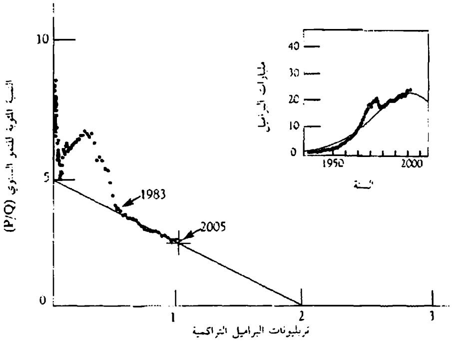
ـ أن نسبة نمو الجماعة البايولوجية السكانية تعتمد بصورة مباشرة على الجزء غير المشغول من قابلية التحمل البيئة.

ـ أن نسبة الإنتاج النفطي تعتمد بصورة مباشرة على كمية النفط الباقية وتحتاج إلى استخراج.

المنظور العالمي

نحن الآن، وقد عرفنا أن طريقة هابرت فعالة، مستعدون لنتعامل مع العالم. ويبدو للوهلة الأولى أن أحداث النفط العالمية تحدث بعد مثيلاتها في الولايات المتحدة بنحو ثلاثين سنة. وبإمكان الولايات المتحدة استيراد أكثر من نصف نفطها. والسبب الدقيق هو أن الصورة العالمية في مرحلة أقل نضجاً. ونبدأ كما بدأنا سابقاً من خلال وضع خط بياني للإنتاج (P) والإنتاج المتراكم (Q). وسيستقر المنحنى P/Q مقابل Q للعالم بعد سنة 1983 إلى خط مستقيم تقريباً وتلك النقطة تماثل سنة 1958 للولايات المتحدة.

إن أفضل خط مستقيم تمت ملاءمته بواسطة الحاسوب للمعلومات منذ 1983 لغاية 2003 يمتد هابطاً إلى قيمة تبلغ تريليوني برميل تقريباً لكمية Q_t، أي الإنتاج التراكمي الكلي لنفط العالم عندما تنضب آخر بئر. ويتوقع العديد من محللي الأمور النفطية حدوداً قصوى للإنتاج تقع ضمن 10٪ من ذلك التقدير. لكن محللين آخرين، وهم من المعتقدين بالوفرة، يتقبلون تقديرات أكبر من ذلك بكثير[7].



يستقر إنتاج النفط في العالم بعد سنة 1983 إلى خط مستقيم بصورة معقولة. وأحسن خط ملائم للفترة 1983 لغاية 2003 له نقطة تقاطع تمثل a عند قيمة تبلغ 0,05 وتقاطع يمثل aQ_t عند 2 تريليون برميل. والنقاط تبعد إحداها عن الأخرى سنة واحدة. وتقديري لسنة الذروة للمنحنى السلس هي 24 تشرين الثاني/ نوفمبر 2005، أي يوم عيد الشكر. والشكوكية تأخذنا بصورة تقريبية شهراً واحداً على جانبي يوم عيد الشكر. والإنتاج في السنوات المفردة بالطبع قد يصعد أو يهبط قليلاً، لذا فليس من الواضح أي من السنين التقويمية قد تكون سنة الرقم القياسي. أما المخطط الثانوي فيبين نفس المعلومات بهيئة إنتاج مقابل الزمن.

---

(7) انظر: H. W. Parker, «Demand, Supply Will Determine When World Oil Output Peaks,» *Oil and Gas Journal*, vol. 100 (11 November 2002), pp. 40-48.

وكمثال، فإن هيئة المسح الجيولوجي للولايات المتحدة كرست مائة سنة/رجل لتقدير كافة الإمكانيات النفطية في العالم، وتوصلت إلى الرقم 3,012 تريليون برميل. وما من أحد منا لديه مائتا سنة/رجل ليقوم بتشريح وانتقاد هذا التحليل. والذي يبدو أنه حدث تصوره قصة المقابلة التي أجرتها شركة شل لثلاثة أشخاص هم جيولوجي وجيوفيزيائي ومهندس مكامن نفطية (وهم المجموعة التي تقوم بتقدير الاحتياطي). وكان أحد الأسئلة (ما ناتج اثنين مضروبة في اثنين؟) وأجاب الجيولوجي أن الجواب يحتمل أن يكون أكثر من ثلاثة وأقل من خمسة، لكن المسألة قد تستفيد من كمٍّ أكبر من البحوث. أما الجيوفيزيائي فقد كبس الأزرار على حاسوبه المحمول على كفه، وأعلن أن الإجابة هي 3,999999. وبالنسبة لمهندس المكامن، فقد قفز ليغلق الباب ثم ستائر الشباك ويسحب قابس الهاتف، ثم يسأل بصوت خفيض «كم تريدها أن تكون؟»[8].

والأهم هو العلامة التي تبين توقيت إنتاج نصف Q_t. وتلك هي ذروة أكثر المنحنيات ذات الدلالة الرمزية ملائَمة، وهي القمة في ذروة هابرت. وتلك هي السنة التي كنت أخشاها، وهي في أساسها هنا. لقد مددنا توجه الخط المستقيم بدرجة قليلة فقط لنصل إلى الذروة. وحتى إذا ما كانت تقنية مستقبلية إعجازية ستحني الخط خارجاً إلى موقع الثلاث تريليون برميل فإننا بحاجة إلى هذا الإعجاز ليأخذ محله هذا العام. وهناك كافة المؤشرات القائلة بأن العالم سيمر عبر الذروة ثم سيقوم بالتساؤل عما حدث.

لقد كانت سنة 1970 هي سنة الإنتاج الأعظم في الولايات

---

(8) كانت هذه النكتة تدور بضع سنوات قبل أن تقوم شل بمراجعة احتياطيها وخفض أرقامه سنة 2004. ويدّعي مايكل إيكونوميدس، وهو مهندس نفط في جامعة هيوستن، بأنه هو الذي ابتدع هذه النكتة.

المتحدة ولم تكن سنة 1976 وهي سنة الذروة على المنحنى السلس. ولم يلاحظ ذلك بصورة مباشرة حتى أولئك المختصون بدراسة القضية من بيننا. وكان من الممكن تماماً أن الإنتاج في سنة لاحقة قد يفوق إنتاج سنة 1970. وقد أتى التأكيد عندما أنهت هيئة سكك حديد تكساس في سنة 1972 تقنين الإنتاج (كان معظم النفط في الأصل يشحن على عربات حوضية للسكك الحديدية، لذا حصلت هيئة سكك حديد تكساس أثناء الكساد العظيم على مهمة دعم السعر القومي للنفط من خلال تحديد الإنتاج في تكساس). وكان إنهاء تقنين الإنتاج إشارة إلى أن الولايات المتحدة كانت قد تخلصت حديثاً من سعة الإنتاج غير المستغلة.

كانت أوبك (OPEC) قد أنشئت بعد دراسة متفحصة لهيئة سكك حديد تكساس. وكانت تجربة تكساس قد أظهرت أن تنظيم الإنتاج من منتج واحد مسيطر، بإمكانها تثبيت سعر النفط الخام لمجمل الصناعة. وبدأت أوبك، التي أنشئت سنة 1960، بخمسة أقطار أعضاء، ثم شاركت فيها ثماني دول أخرى بعد ذلك. وانتهت طاقة الإنتاج الفائضة لدى أعضاء أوبك واحداً بعد الآخر، حتى بقيت العربية السعودية لوحدها بطاقة إنتاج فائضة. وكان السعوديون منذ سنة 1997 فصاعداً تقريباً، في موقف متفرد، قادرون على تنظيم الإنتاج. وكان الهدف الحفاظ على سعر النفط العالمي ضمن المدى الذي تهدف إليه أوبك وهو بين 22 و28 دولاراً للبرميل. وأعلن السعوديون في السادس من آذار/ مارس 2003 في خبر لم يلحظه إلا القليلون، أن إنتاجهم وصل حده الأعلى عند 9,2 أو 9,5 مليون برميل في اليوم[9]. ولم تكن توجد منذ سنة 2003 أي سعة إنتاج ملحوظة غير

(9) حملت (Dow Jones Newswire) في 6 آذار/ مارس 2003 إعلان السعودية، والجملة الرئيسية هي: «لقد أخبرت السعودية الحكومات الغربية ومسؤولي النفط إن إنتاج =

مستغلة في أي مكان في العالم. وهذا استنتاج فائق الأهمية، فلقد قمنا حتى الآن بالبحث في ثلاثة أدلة:

- الخط البياني على صفحة 96 الذي يخبرنا بأن منحنى الإنتاج اللوجستي المعدل سيصل ذروته سنة 2005 أو في الأشهر الأولى لسنة 2006.

- إن إنتاج النفط العالمي كان ثابتاً تقريباً منذ سنة 1998(*).

- لا يوجد أي قطر، بما في ذلك العربية السعودية، لديه سعة إنتاجية غير مستغلة.

وقبل أن نتمسك بهذه الأدلة الثلاثة، معتبرين إياها قوية بما فيه الكفاية، كدليل لوضع خطتنا، فإن بعض المعلومات الإضافية لها صلة بالموضوع، فالإنتاج هو الخطوة الأخيرة من ثلاث خطوات في سلسلة التجهيز العليا (Upstream Supply Chain):

الخطوة الأولى هي اكتشاف الحقل النفطي، وهذا يحدث مرة واحدة فقط، فبعد أن تحفر أول بئر ناجحة لن ينسى موضعها بحيث تذهب لاكتشاف الحقل ثانية. ويمكن للحقل عبر الزمن أن يصبح أكبر وأعمق لكن ما لا يمكن تجنبه هو أن امتداد الحقل بأكمله سيتم

المملكة من النفط الخام قد وصل حدوده عند 9,2 برميل في اليوم، ولن يزيد أكثر من هذا حتى مع الحرب على العراق التي تخيم على المنطقة.

ملاحظة: ورغم ذلك، فإن معدل إنتاج السعودية خلال 2006 بلغ 10,164 مليون برميل في اليوم، وارتفع إلى 10,638 مليون برميل في اليوم سنة 2007، ثم إلى 11,114 مليون برميل في اليوم سنة 2008،

[(المصدر: .B. P. Statistical Review of World Energy)] (المترجم).

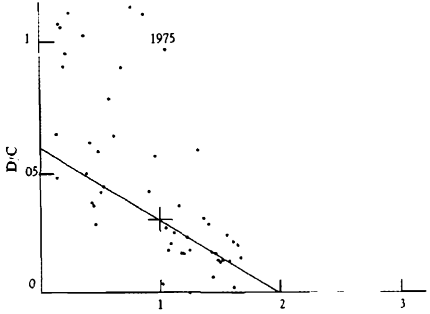
(*) كان إنتاج النفط العالمي يبلغ 72,379 مليون برميل في اليوم سنة 1998، لكنه ارتفع سنة 2006، وهي السنة التي نشر فيها هذا الكتاب، إلى 81,659، وهذا يمثل زيادة تبلغ 12,9٪ تقريباً عبر سبع سنين، أو نحو 1,85٪ سنوياً (المصدر: *B. P. Statistical Review of World Energy 2008*).

استغلاله في النهاية. وهناك نقطة صغيرة: قد تنمو بضعة حقول مستقلة في بعض الأحيان لتجتمع مكونة حقلاً عملاقاً، لكن ما يتم اعتباره فعلاً هو أول بئر جرى حفرها.

وبعد بدء الإنتاج يوسع الحفر التطويري الامتداد الجغرافي للحقل، كما يزيد من عمقه، وقد يستغرق ذلك عقوداً. وعندما يتم تحديد موقع الآبار في مناطق ممتدة من المكمن (أو المكامن)، فإن النفط الذي سينتج من هذه الآبار الفعلية سيجري إدراجه «كاحتياطي». ويفترض أن يضاف مجموع احتياطي الحقل المفرد إلى احتياطات القطر، وفي النهاية إلى الاحتياطي العالمي.

الإنتاج مقابل الاحتياطي

لما كنا قد بدأنا بالإنتاج لذا سنقوم بالعمل باتجاه خلفي لنتعامل مع الاحتياطي ونتفحص تاريخ أول بئر ناجحة في كل حقل. استخدم هابرت في ورقته سنة 1962 احتياطي الولايات المتحدة ليتجنب استخدام آراء «خبراء» حول كمية النفط الكلية القابلة للاستخراج. كذلك استخدم هابرت كلمة «اكتشاف» لتعني كل النفط المتراكم المنتج في سنة محددة زائداً الاحتياطي المعروف كما كان في تلك السنة. و«الاكتشاف» بالنسبة لهابرت هو نوع من النقاط على لوحة تسجيل: أي كل النفط المكتشف تراكمياً حتى تلك السنة. وقد قضيت وقتاً صعباً مع الجمل التي سبقت، فقد أردت أن أطبع «اكتشاف» لأعني بها حسب المعنى السائد أول بئر في الحقل. لذا وبسبب وجود قدر كبير من الإرباك حول أساليب هابرت سأقوم باستخدام «اكتشاف» للإنتاج زائداً الاحتياطي، وساستخدم كلمة «ضربة حقل» عندما أعني بها أول بئر في الحقل.



عرّف هابرت «الاكتشافات» ككمية النفط التراكمي المنتج لغاية سنة معينة زائداً الاحتياطي المعروف والموجود في الأرض في تلك السنة. وقد تم في هذا المخطط البياني طرح الزيادات الفجائية التي أعلنتها دول أوبك في الثمانينيات. كذلك قامت مجلة (*Oil & Gas Journal*) في سنة 2002 بإضافة 175 مليار برميل من الاحتياطي تمثل الرمال القيرية في كندا، وهذه ليست مشمولة في هذا المخطط، لأن وسائل الإنتاج على ذلك المستوى لم تكن موجودة موقعياً. وآخر اكتشافات الحقول العملاقة كان حقل (Cantarall) البحري التابع للمكسيك سنة 1975. ولا توجد في هذا المخطط أي أدلة لنفي التقدير السابق البالغ 2 تريليون برميل لمقدار الاستخلاص الكلي.

إن تقدير الاحتياطي أمر محفوف بالفوضى. والاحتياطي في أكثر هيئاته تنظيماً هو ببساطة:

(الطول × العرض × السماكة × المسامية × النسبة المئوية المتوقعة للاستخلاص). هناك عادة بعض الغش على مستوى بسيط، لأن غالبية المهندسين محافظون جداً ويفضلون أن تكون تقديراتهم على الجانب الواطئ. أما على المستوى الواسع فستدخل الأولويات

السياسية (وكنا ندعوها عندما كنت في دراستي الجامعية الأولية «الضرب بثابت فيناغل»[*]).

وقد شخّص الجيولوجي المؤمن بآراء هابرت المدعو كولن كامبل (Colin Campbell) أكبر حدث للاحتياطي المتعلق بالسياسة: ففي أواسط الثمانينيات تضاعف احتياطي معظم أقطار أوابك بصورة فجائية[10]، ولم يجرِ حفر أي آبار جديدة إنما تمت مراجعة حصة الإنتاج ضمن أوبك لتشمل الاحتياطي إضافة إلى الطاقة الإنتاجية. وقمنا كامبل (وأنا) بالقسمة على ثابت فيناغل لخصم الزيادات الفجائية. وكنت شديداً جداً في البداية، لكن استعادة النظر تجعلني أقول إن 20٪ من الزيادات الفجائية كانت مراجعات صادقة للاحتياطي، أما الـ 80٪ الباقية فقد تجسدت من لاشيء.

ومن الممكن للاكتشافات حسب تعريف هابرت أن تكون ذات رقم سلبي خلال سنة ما، وذلك إذا ما كانت تقديرات الاحتياطي لتلك السنة أكبر من الإنتاج الفعلي خلال السنة.

إن منهجية تحليل الاكتشافات هي ذاتها المستخدمة للإنتاج. قم بتأشير الاكتشافات المتراكمة على المحور الأفقي للخط البياني، وأشّر الاكتشافات السنوية مقسومة على الاكتشافات المتراكمة على المحور العمودي، وسترى أن تشتت النقاط حتى للسنين الحديثة أكبر من التشتت للنقاط التي رأيناها على مخطط الإنتاج. وتعتمد النقاط بعد 1985 على التعامل مع الزيادات الفجائية لاحتياطيات أوبك التي

(*) قوانين فيناغل (Finagle Laws): مجموعة من القوانين الساخرة شبيهة بقوانين باركنسون حول تنفيذ الأعمال العلمية، وضعها بعض المتشائمين الساخرين.

(10) انظر: Colin Campbell, *The Coming Oil Crisis* (Geneva: Multi-Science Publishing Company, 1997), p. 73.

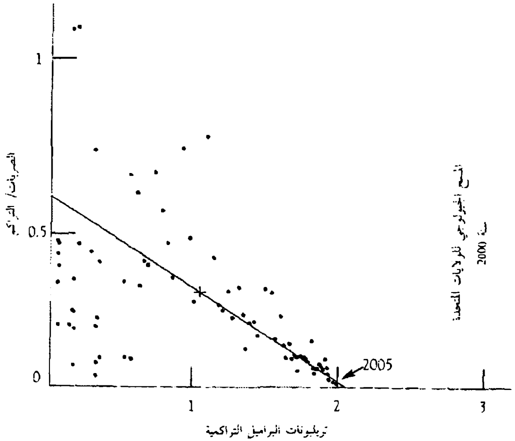
أعلن عنها، لكن خطّاً يضعه الحاسوب يبين مع ذلك أننا اجتزنا ذروة الاستكشاف منذ سنة 1977. والمدهش أكثر من ذلك هو التوقع بأن النفط الذي «اكتشفناه» (من حيث أننا نعتبره كاحتياطي) يمثل 82٪ من كل النفط الذي سيتم اكتشافه في أي وقت. كآبة.

ضربات اكتشاف حقول جديدة

إن كلمة «اكتشاف» كما قلنا سابقاً تعبير استخدمه هابرت، لذا سأدعو البئر الأولى في الحقل النفطي «ضربة البئر». وسنوات «ضرْب» الآبار معروفة بصورة عامة، فقد نشر كارمالت وسانت جون (Carmalt and St. John) قائمة بكافة حقول النفط والغاز في العالم التي تحوي أكثر من 100 مليون برميل من النفط القابل للاستخراج[11]. ونحن هنا لا نحسب عدد حقول النفط بل إننا نحسب عدد البراميل التي نتوقع الحصول عليها من ضربات الحقول الجديدة كل سنة. وسنستخدم نفس الطريقة القديمة: أشّر مجموع الضربات أفقياً وأشّر نسبة الضربات السنوية الجديدة إلى مجموع الضربات المتراكمة عمودياً، وارسم أفضل الخطوط الملائمة. ومجموع الضربات المتوقعة عندما نكملها هو 2,013 تريليون برميل. والسنة الوسطى وذروة الحد الأعلى للمنحني اللوجستي السلس: 1965. لكن أسوأ ما في الأمر هو أن ضرباتنا قد أصابت 94٪ من مجموع النفط الذي نتوقع أن تصيبه ضرباتنا. كآبة.

---

(11) انظر: Sam Carmalt and Bill St. John, «Giant Oil and Gas Fields,» in: Michel Thomas Halbouty, ed., *Future Petroleum Provinces of the World*, AAPG memoir; 40, Proceedings of the Wallace E. Pratt Memorial Conference (Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 1986), pp. 11-53.



إن القيام بعزو مجمل النفط الموجود في الحقل إلى السنة التي حفر فيها أول بئر منتج في الحقل يعطينا هذا الاستنتاج اللافت للنظر: إن الحقول التي هي قيد الإنتاج حالياً تحوي 94٪ من مجمل النفط الذي سنجده في أي وقت. وبدلاً من إنتاج كلي يبلغ 2 تريليون برميل فإن أحسن خط ملائم على هذا المنحني يقاطع المحور الأفقي عند 2,013 تريليون. وهذا أقل جداً من رقم 3,012 تريليون برميل حسبما قامت هيئة المسح الجيولوجي في الولايات المتحدة بتقديرها في *(World Petroleum Assessment)* لسنة 2000. وهناك أربعة حقول في الشرق الأوسط كبيرة بدرجة تدفع نقاط السنين التي اكتشفت فيها خارج المنحني (وخارج الصفحة) رغم أنها ليست مستثناة من الخط البياني. وهذه الحقول هي كركوك العراق 1927 وكاش ساران وحفت كيل إيران 1928، والبرقان الكويت 1938، والغوار السعودية 1948. ويحدث أحياناً أن تمتزج عدة حقول تبدو مستقلة في حقل واحد عملاق. ومحو كافة المكررات في القائمة مهمة بطيئة وتستغرق وقتاً طويلاً. كذلك فإن ساحل الخليج في الولايات المتحدة والمناطق البحرية في غرب أفريقيا تضم كميات ملحوظة من النفط إنما في عدد كبير من حقول لا تصنف كعملاقة ويصعب إدراجها.

النظرة الشمولية الآن

باستطاعتنا الآن وضع صورة مدمجة لوضع النفط العالمي من خلال تجميع الإنتاج والاكتشافات وضربات الحقول الجديدة على مخطط بياني واحد.

ونجد أدناه لوحة التسجيل الرقمية لأحسن الخطوط الملائمة.

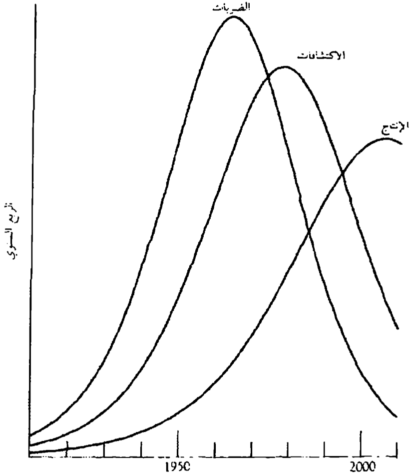
	السنين المستخدمة	نقطة a	نقطة Q_t	الذروة	النسبة المئوية
الإنتاج	2003 ـ 1983	0,059	2,013	2005	49
الاكتشافات	2002 ـ 1976	0,072	2,013	1978	82
ضربات الحقول	2003 ـ 1965	0,081	2,013	1964	94

وسأفترق عند هذه النقطة بصورة بسيطة مع الأسلوب الذي استخدمه هابرت. فقد تعامل هابرت مع «الاكتشافات» كمكرر لمنحني إنتاج منزاح زمنياً. لكن ذلك غير ممكن، ففي صبيحة 28 آب/ أغسطس 1859 وجد أدوين دريك والحفار الذي كان يعمل معه أن بئره بدات تمتلئ بالنفط.

ولم يقل دريك للحفار «إننا نستطيع البدء بالإنتاج بعد اثنتين وعشرين سنة من الآن»، فقد بدأ الإنتاج وبدأت الاكتشافات وضربات الحقول على المستوى العالمي كلها سوية. وكان على ضربات الحقول أن تنمو أسرع من الاكتشافات. وكان على الاكتشافات أن تنمو أسرع من الإنتاج.

إن منحني الضربات الجديدة للحقول يُظْهِر كأن لعبة النفط قد انتهت تقريباً (انظر الصفحة 106) والسيدة السمينة تغني «هناك مائة مليار برميل» فقط لتكتشف. وأي شخص يدعي وجود 60 مليار برميل في منطقة بحر قزوين سيكون قد أتى على الجزء الأكبر من المتبقي.

وتخميني أن المتبقي من الاكتشافات سيبدو كتصريف ورقة نقدية فئة مائة دولار: عشرون واحدة، وعشرتان، وخمستان، وعشر أوراق فئة دولار واحد، ولفّة من أرباع الدولار، ولفتان من فئة عشر سنتات، وخمس لفات من فئة خمس سنتات، وعشرون لفة من السنتات. وأرجو ألاّ تسخر، فكل من هذه السنتات يمثل 10 ملايين برميل من النفط القابل للإنتاج: ويسعر 40 دولاراً للبرميل، سيكون ذلك نحو 400 مليون دولار.



يصور تحويل الخطوط الأكثر ملائمة من المنحنيات الثلاثة الماضية إلى المنتوج السنوي مقابل الزمن الخطأ الذي اقترفه هابرت. وقد أفاد هابرت أن منحني الاكتشاف سيكون مماثلاً في شكله منحني الإنتاج، لكنه سيكون منزاحاً بعدد محدد من السنين. والمساحة داخل المنحنيات الثلاثة متساوية، وهي 2,013 تريليون برميل. والمنحني الذي يصل ذروته بأسرع وقت (منحني ضربات الحقول) يمتلك أعلى وأدق ذروة. أما الاكتشافات حسب مفهوم هابرت، أي الإنتاج المتراكم زائداً الاحتياطي، فتحتل موقعاً وسطاً بين ضربات الحقول الجديدة والإنتاج.

هل هذه هي الحكاية التي لا يمكن تجنبها؟ لقد تقبلتَ من ناحية، إذا ما نظرت إلى صفحة 89، عندما تركتني أرسم ذلك الخط المستقيم خلال التاريخ الإنتاجي للولايات المتحدة، تحليلَ هابرت بكليته. وبعد رسم ذلك الخط المستقيم لم تجرِ أي تخمينات نظرية أخرى أو أي تقريبات (نعم كان عليّ أن أكشف تلاعب أوبك بزيادات الاحتياطي). وكان الاستنتاج النظري الرئيسي يقول إن الخط المستقيم يحتاج إلى أن يعتمد الإنتاج (الاكتشافات وضربات الحقول الجديدة) بصورة مباشرة خطية على الجزء غير المنتج (غير المكتشف ولم تضرب حقوله).

ويجري في هذه الفترة الخاصة الضيقة، حين يصل إنتاج النفط ذروته، تمديد الخط لمسافة قصيرة فقط. وحتى إذا ما صادف وحدثت معجزة من نوع ما فيما بعد لكي تحرك مجمل الإنتاج العالمي لما هو أكثر من 2 تريليون برميل، فإن تلك المعجزة لن تحرك الإنتاج بصورة حادة صعوداً خلال السنتين القادمتين.

الفصل الرابع
الغاز الطبيعي

إذا ما نظرت إلى برج حفر فلن تعرف إذا ما كان يجري بواسطته التنقيب عن النفط أو الغاز. ولا يقتصر التشابه على أنواع أبراج الحفر، بل يشمل ذلك إستراتيجيات التنقيب وتقنيات إنهاء الآبار. والغاز الطبيعي مثل النفط أخف من الماء، لذا فإن الإستراتيجية تتضمن البحث عن مصيدة مقعرة مقلوبة إلى الأسفل تقوم بالإمساك بالنفط أو الغاز وتمنعهما من أن يطفوَا إلى السطح.

وهناك وحدتان متماثلتان تقريباً تستخدمان لقياس الغاز الطبيعي وبيعه: **إحدى الوحدتين** هي ألف قدم مكعب في الظروف القياسية (حرارة الغرفة وضغط جوى اعتيادي)، **والوحدة الأخرى** هي توليد الحرارة البالغ مليون وحدة حرارية بريطانية (British Thermal Unit) أو (BTU)، وهي الطاقة الكافية لرفع درجة حرارة باوند واحد من الماء درجة حرارة فهرنهايتية واحدة. ويولد حرق ألف قدم مكعب من الغاز الاعتيادي ما يقارب مليون BTU. وإذا ما كان لشخص ما أعراض انعزالية مترية، فإن مليون BTU قريبة من غيغاجول. وما لم تكن الشعرة تقلق حول تفاصيل عقد رئيسي لتجهيز الغاز، فإن كل هذه الوحدات متماثلة عملياً.

وهناك اختلافات رئيسية بين آبار النفط وآبار الغاز رغم التشابه بينهما:

- لا توجد على آبار الغاز المنتجة مضخات ترددية تحني وترفع رؤوسها الشبيهة برؤوس الأحصنة حين تقوم بضخ النفط من البئر. بدل ذلك يوجد على فوهة بئر الغاز مجموعة من الأنابيب والصمامات تدعى (شجرة عيد الميلاد)(*).

- يجري نقل معظم الغاز تقريباً بواسطة خطوط الأنابيب. وكلفة الربط بواسطة خط أنابيب تشكل الجزء الرئيسي من اقتصاديات الغاز الطبيعي. وتبرر حقول الغاز الكبيرة بناء خطوط أنابيب جديدة. لكن حقل غاز صغير منعزل به بئر واحدة أو عدد قليل من الآبار لن يعوض إنتاجه كلفة الربط إلى خط الأنابيب.

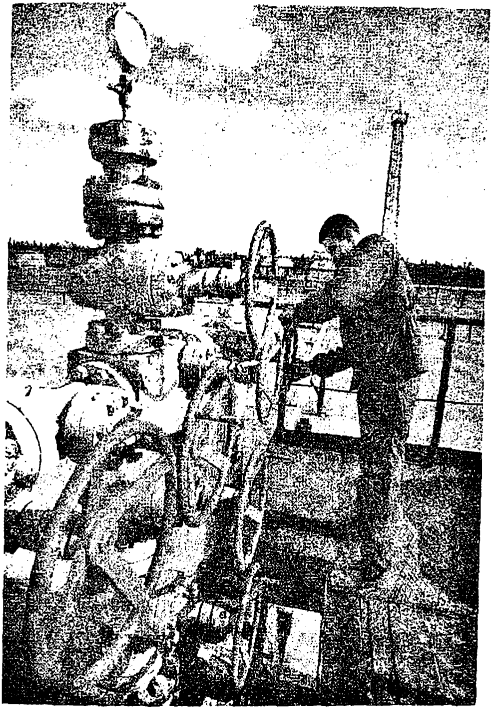
- لا يعاني الغاز عند انسيابه من الصخر إلى البئر إلا القليل من الاحتكاك مقارنة بالنفط أو الماء. ومقاومة التدفق التي تدعى تقنياً لزوجة (Viscosity) لا تتجاوز في الغاز نحو واحد بالمائة من مقدارها في النفط أو الماء. ويمكن للصخور ذات النفاذية التي تعتبر أوطأ من أن تنتج كميات اقتصادية من النفط أن تكون مربحة عندما تنتج الغاز الطبيعي.

ويأتينا الغاز الطبيعي من بضع مواقع تحت سطح الأرض. ويجب أولاً أن نفرق بين الغاز التقليدي والغاز غير التقليدي. ونعني بالتقليدي أنواع الغاز التي زودت العالم تاريخياً بمعظم تجهيزاته من الغاز. أما «غير التقليدي» فنخص بها الأصناف التي لم يجر التنقيب عنها بصورة وافية. مع ذلك لا يوجد أي نوع من الأنواع غير

(*) هذا الترتيب من الأنابيب والصمامات يوجد كذلك على آبار النفط المنتجة دون مساعدة مضخات.

التقليدية يعتبر جديداً بالنسبة لنا، فقد رأينا أمثلة منها منذ ثلاثين عاماً أو أكثر. وسأبحث في الأنواع غير التقليدية من الغاز فيما بعد ضمن هذا الفصل. أما الأنواع التقليدية فهي:

- الغاز المصاحب (أو الغاز المذاب) (Solution Gas): ينفصل النفط والغاز المذاب فيه عندما يكون تحت الأرض إلى مزيج رغوي من الغاز والنفط عندما ينخفض الضغط عليه. وكان الغاز المذاب هو القوة الدافعة التي أرسلت النفط تاريخياً متدفقاً من آباره إلى ارتفاعات تعلو على برج الحفر. لكن الضغط في المكمن النفطي ينخفض وتمنع الرغوة الناتجة تدفق النفط إلى قعر البئر. وإنتاج النفط الذي يدفعه الغاز المذاب له سمعة غير مستحسنة في كونه لا يستخلص سوى 20 إلى 40 بالمائة من النفط من المكمن. ولما لا توجد لدينا أي طريقة لحفاظ على الغاز المذاب ولإنتاج النفط، فقط أصبح الغاز أساساً ناتجاً عرضياً مجانياً مصاحباً لإنتاج النفط. وكان إنتاج الغاز المصاحب حتى سنة 1965 سبباً في الحفاظ على سعر يتراوح بين 3 و7 سنتات لكل ألف قدم مكعب.



لا تتطلب آبار الغاز عادة مضخات أو أبراج حفر دائمة. وهذه البئر للغاز في غرب سيبيريا مثال لذلك. والنسبة المئوية من الغاز الطبيعي في العالم في غرب سيبيريا تماثل تقريباً النسبة المئوية لنفط الشرق الأوسط نسبة إلى مجمل نفط العالم (برايان (Bryan) وشيري أليكساندر ((Cherry Alexander)

ـ القباب الغازية (Gas caps): تحتوي الصخور المسامية في بعض المكامن تحت الأرض كمية من الغاز تفوق إمكانية ذوبانه في النفط السائل الموجود، لذا تتشكل «قبة غازية» فوق النفط. ومن الممكن إنتاج النفط والحفاظ على الغاز في القبة لكي ينتج لاحقاً. ويوجد خيار لحفر البئر ليخترق الطبقة المشبعة بالغاز والطبقة المشبعة بالنفط، وأن يتم تثبيت «بطانة» من الصلب (تدعى أنبوب التغليف) بالإسمنت إلى قعر البئر تماماً[1]. وتقوم أدوات التسجيل التي تدلّى في أعماق البئر بواسطة الكابلات بقياس سمك وعمق الطبقات الغازية والنفطية والمائية. ويتم بواسطة شحنات متفجرة ذات شكل خاص فتح ثقوب في البطانة في المنطقة النفطية لغرض الإنتاج. والقبة الغازية المتمددة أكثر كفاءة نوعاً ما في استخلاص النفط، ويصل ذلك إلى 30 وإلى 50 بالمائة من النفط الموقعي. وبعد إنتاج النفط الذي يعتبر الأكثر ربحية لا يزال الغاز في القبة الغازية متاحاً.

ـ ما وراء النافذة النفطية: إن «النافذة النفطية» هي المنطقة الموجودة على أعمق تتراوح بين 7500 و 15000 قدم، حيث تكون درجات الحرارة ساخنة بما فيه الكفاية لبدء تكسر الجزيئات العضوية إلى سوائل نفطية ذات محتوى كاربوني يتراوح بين خمس ذرات وعشرين ذرة في كل جزيئة. وتستمر عملية التكسر مع زيادة العمق. وعند الوصول إلى عمق 15000 قدم يتكسر النفط إلى جزيئات ذات ذرة كاربون واحدة، أي إلى غاز الميثان وهو الجزء السائد في الغاز الطبيعي. والصخور المطمورة الآن أو التي كانت في أي عصر سابق مطمورة على أعماق تتجاوز 15000 قدم، مرشحة لأن تنتج الغاز إنما

---

(1) أنشأ إيرل ب. هاليبرتن (Earle P. Halliburton) شركته استناداً إلى طريقته ومعداته لتثبيت البطانة بالإسمنت في البئر موقعياً.

ليس النفط. (وهناك استثناء بسيط: تحتوي بعض التكوينات إلى أعماق 17000 قدم النفطَ، وذلك بسبب الترسبات السريعة جداً أو بسبب درجات الحرارة الأوطأ من العادي). وقد تعلم رجال النفط كيفية تجنب هذه المناطق التي يقتصر محتواها على الغاز فقط. ومع ذلك، فإن هذه المناطق الخالية من النفط بدأت تصبح مرشحة اقتصادياً للحفر منذ سنة 1979 عندما ارتفع سعر الغاز إلى ما يزيد على دولار واحد.

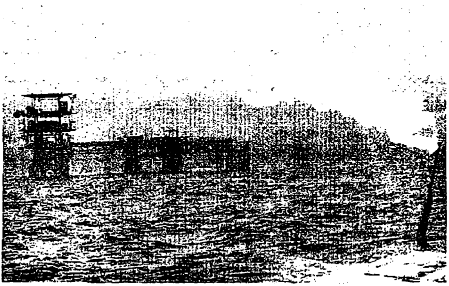
وقد تجاوز عدد الآبار التي تُحفر بحثاً عن الغاز الطبيعي في الوقت الحالي في الولايات المتحدة عن تلك التي تحفر بحثاً عن النفط، فقد بين احتساب شركة بيكر هيوز (Baker Hughes) لأبراج الحفر العاملة في 19 آذار/ مارس 2004 بحثاً عن النفط 162 برج حفر مقارنة بـ 963 برجاً للبحث عن الغاز.

لكن متى سينفد الغاز الطبيعي؟ إنه ليس بالسؤال البسيط، فالتحليل الذي ابتكره م. كينغ هابرت للنفط الخام لا يمكن تطبيقه على الغاز الطبيعي بسهولة، فرغم أن تقارير مجلة (*Oil & Gas Journal*) في نهاية السنة تذكر احتياطي الغاز الطبيعي لكل قطر، إلاّ أنها لا تشمل إنتاج الغاز.

وهناك عدد من التفسيرات، فبعض الغاز يستخدم محلياً ولا يجري قياسه، بينما تجري مراقبة النفط الخام ما أن يتم إنتاجه ثم يراقب ثانية عندما يدخل إلى المصفاة. وهناك مشكلة أخرى تتعلق بالغاز المصاحب للإنتاج النفطي الذي يتم «حرقه» قصداً بكميات هائلة في شعلة في الهواء الطلق. هل سنحسب ذلك الغاز المحروق إنتاجاً في حسابات هابرت؟

وكان معظم الغاز الطبيعي المصاحب لإنتاج النفط قبل خمسين

عاماً يُحرق. أذكر بوضوح عندما مررت بالسيارة عبر شعلة غازية في فيدلر كريك بولاية وايومنغ سنة 1952، وكانت الحرارة لا تطاق، وكانت الأعشاب البرية عبر دائرة نصف قطرها مائة ياردة حول الشعلة قد انشوت. وكانت أكثر المناظر وضوحاً من فعل الإنسان لأول رواد للفضاء حينما داروا حول الأرض هو منظر شعلات الغاز في أميركا الشمالية والشرق الأوسط. ومع أخذ أسعار الغاز المتصاعدة بنظر الاعتبار يتعجب المرء لرؤية أي غاز لا يزال يهدر (إن تنفيس الغاز إلى الجو دون حرقه أكثر ضرراً، فالميثان ذو تأثير أكبر بكثير من ثاني أوكسيد الكاربون كغاز دفيئة).



كان الكثير من الغاز الطبيعي المصاحب لإنتاج النفط تاريخياً يحرق في الفضاء المفتوح. وهذا مشعل للغاز في المياه البحرية بجوار شبه جزيرة سيناء (كيفن فليمنغ (Kevin Fleming)، CORBIS).

وإليك لوحة التسجيل للغاز المحروق بمليارات الأقدام المكعبة في اليوم كما أوردتها وكالة معلومات الطاقة في الولايات المتحدة.

3,7	أفريقيا (1,7 منها في نيجيريا)
1,7 ـ 3,2	دول الاتحاد السوفياتي السابق
1,6	الشرق الأوسط (يشك في كون الرقم واطئاً جداً)
0,2 ـ 0,7	آسيا
1,2 ـ 1,7	أميركا الشمالية
3.0	أوروبا
9,2 ـ 12,5	مجموع العالم

ونذكر لغرض المقارنة أن الولايات المتحدة تستهلك يومياً ما معدله 60 مليار قدم مكعب من الغاز. ولا يستهلك أو يحرق جميع الغاز المنتج، فالبعض منه يجري إعادة حقنه في قمة الطبقة المشبعة بالنفط لإحداث قبة غازية أو لتوسيع قبة موجودة حالياً. (هذه هي الممارسة المتبعة حالياً في حقل برودو باي (Prudhoe Bay) العملاق في شمال ألاسكا)، فحقن الغاز يحسّن من استخلاص النفط كما يحفظ الغاز لتسويقه مستقبلاً.

أما الغاز الطبيعي الذي يصل إلى خط الأنابيب، فيخدم تشكيلة من الأسواق، فالغاز في الولايات المتحدة يستخدم لتوليد القوة الكهربائية (24٪)، وللاستخدامات الصناعية (35٪)، ولتدفئة البنايات التجارية (16٪)، ولتدفئة المنازل (25٪). ويشمل الاستخدام الصناعي بعض الاستخدامات التي لا تستغله للتسخين، فبعضه يستخدم في الصناعة البتروكيميائية. أما الهيدروجين المشتق من الغاز الطبيعي فيعامل مع النيتروجين الجوي لإنتاج الأسمدة. واستخدام 24٪ من الغاز الطبيعي لتوليد الكهرباء هو ظاهرة جديدة، ففي عهد إدارة نيكسون تم تشخيص الغاز كنوع من أنواع الوقود الممتازة ومُنع استخدامه لتوليد الكهرباء منعاً صارماً. أما لوحة التسجيل لتوليد الكهرباء لسنة 2000 فإليك إياها:

التوليد السنوي للكهرباء في الولايات المتحدة (مليارات الكيلوواط ـ ساعة)

من الفحم الحجري	1,968
من المحطات النووية	752
من الغاز الطبيعي	612
من القوة المائية	237
من النفط	109
من مصادر أخرى	84 (تشمل الريح والمصادر الجوفية).

وهناك نوع من قسمة العمل بين مصادر القوة الكهربائية، فمحطات توليد الكهرباء النووية تعمل على أفضل وجه بحمل ثابت مستقر طوال الساعات الأربع والعشرين خلال اليوم. لذا، فإن ما يدعى الحمل الأساسي، وهو الطلب الموجود على طول الوقت تتم تغذيته من المحطات النووية، وعادة ما تكون الكلفة الرأسمالية للمحطات النووية عالية جداً بينما تكون كلفها التشغيلية واطئة. وبالنسبة للمحطات التي تحرق الفحم بكُلَف وقودها الواطئة، فتسود في السوق الوسطى للمتطلبات التي تتجاوز الحمل الأساسي وتتواجد لفترة لا بأس بها خلال اليوم، أما في الأوقات الاستثنائية القليلة للأحمال القصوى التي قد تبرز بعد ظهر يوم حار ورطب، فإن ما نحتاجه هو قابلية توليد للطاقة ذات كلفة رأسمالية واطئة، حتى إذا كان ذلك يعني كلف وقود عالية. والإجابة هي توربينات غازية شبيهة بالماكنة المحركة للطائرة لكنها تحرق الغاز وتدوِّر مولداً كهربائياً.

وقد وظف الاستخدام المتزايد للغاز الطبيعي لتوليد الكهرباء في عهد مابعد نيكسون السعة الإنتاجية الفائضة في أميركا الشمالية. وكانت الضحية ذات الإمكانية الملحوظة هي السيارة العاملة بالغاز الطبيعي، فقد بدا الغاز الطبيعي كوقود جذاب للسيارات منذ سنة 1981، فهو يطلق كمية أقل من ثاني أوكسيد الكاربون في الجو

مقارنة بالبنزين وله قياس أوكتاني يبلغ 135، ويبقى الجزء الداخلي من المحرك نظيفاً عند استخدامه. وكانت محطات التعبئة بالغاز الطبيعي شغالة سنة 1981 في كل من إيطاليا ونيوزيلندا وكولومبيا البريطانية في كندا. وقد أحب منتجو الغاز الطبيعي وموزعوه الفكرة، لأن ذروة استخدام السيارات تحدث في الصيف، بينما تحدث ذروة استخدام الغاز للتدفئة، أكان ذلك للمنازل أو للبنايات التجارية، خلال فصل الشتاء.

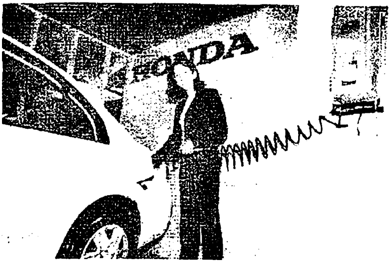
وتحمل السيارات العاملة بالغاز، التي تستخدم ما يعادل عشرة غالونات (نحو 35 ليتراً) من البنزين يومياً، الغازَ في خزانات للضغط العالي. لذا، فإن محطات الملء بالغاز الطبيعي تحتاج نتيجة ذلك كمّاً لا بأس به من المعدات الخاصة. وهنا تبرز قضية البيضة والدجاجة، فالأفراد لن يشتروا السيارات العاملة بالغاز الطبيعي لعدم وجود محطات التعبئة بالغاز، وبدورها، لا تبنى محطاتٌ للتعبئة بالغاز، لعدم امتلاك الناس للسيارات العاملة بالغاز. وتسعى شركة هوندا في تطوير مشوق جديد: تسويق كابسة (Compressor) بيتية للغاز توضع في الكراج المنزلي وتملأ خزان السيارة بالغاز خلال الليل. ومعظم الدور في الولايات المتحدة مرتبطة بشبكة الغاز للطبخ أو للتدفئة. وسيجد من يستخدم السيارة للذهاب إلى عمله يومياً في هذا عامل جذب، لكون أسعار الغاز أقل مما يعادله من البنزين. وسيجد الجميع هذا التطور جذاباً، لعدم وجود طريقة سهلة تستطيع الحكومة بواسطتها استيفاء ضرائب على الوقود. وتجنب الضرائب هي اللعبة الرياضية المفضّلة رقم اثنين لدى الأميركيين.

وقد قدم لنا شتاء سنة 2002 ـ 2003، الذي اتسم ببرودة تفوق المعدل، نظرة إلى أسواق الغاز الطبيعي المستقبلية، ففي آذار/ مارس سبَّب الطلب المستمر والمرتفع على الغاز تناقصَ احتياطات الغاز الطبيعي المختزنة إلى ما دون التريليون قدم مكعب، وهو ما

يعادل تنبيه «مستوى واطئ للوقود» في السيارة. وقامت شركات خطوط الأنابيب بقطع الغاز عن الزبائن ذوي العقود القابلة للإيقاف. وكان عدد من المحللين يكتبون عن تناقص الإنتاج في أميركا الشمالية رغم عدم وجود اتفاق عن سرعة التناقص. ولما كان شتاء آخر شبيه بشتاء 2002 ـ 2003 سيحدث ثانية عاجلاً أو آجلاً، لذا فليس لدينا مرونة فورية لنوجّه كميات رئيسية من الغاز الطبيعي للاستخدام في السيارات. والأمل المرتجى في المستقبل للسيارات العاملة بالغاز الطبيعي يكمن في تحويل كمٍّ أكبر من توليد الكهرباء إلى الفحم أو على المحطات النووية، وبذلك نحرر كميات من الغاز الطبيعي للاستخدام في السيارات.

ويلزم من حيث محتوى الطاقة نحو 6000 قدم مكعب من الغاز لتعادل في محتواها برميلاً واحداً من النفط. ولما كانت غالبية الغاز الطبيعي هي ميثان نقي تقريباً (ذرة كاربون واحد وأربع ذرات هايدروجين)، فإن محتوى الطاقة من مناطق مختلفة سيكون متماثلاً تقريباً. وسيأتي الاختلاف الوحيد البارز من الغاز المذاب المصاحب لإنتاج النفط الذي يحتوي عادة بعض الغازات الهيدروكاربونية ذات ذرتي كاربون أو أكثر. قد لا نعتقد ذلك شيئاً كبيراً، لكن أحد المنتجين في شمال غرب بنسلفانيا وضع بعض الغاز المصاحب في خط أنابيب، وكانت النتيجة انصهار فرن صناعي عند أحد الزبائن على خط الأنابيب(*).

(*) قد يحوي الغاز المصاحب، أو الغاز المنتج من مكامن الغاز، بعض الغازات الأثقل من الميثان، مثل الإيثان أو البروبان أو البيوتان. لكن مهمة مجمعات معالجة الغاز هي نزع هذه الغازات وإبقاء الميثان وحده (وربما نسبة واطئة جداً من الإيثان) قبل أن يرسل الغاز إلى المستهلك. وإذا ما كان الاستهلاك في معدات حساسة، مثل التوربينات الغازية، وجب على المستخدم التأكد - بواسطة تجهيزات خاصة في معداته، - من خلو غاز الوقود من أي آثار لمكونات غازية ثقيلة يمكن في ظروف خاصة (كانخفاض درجات الحرارة) أن تتكثف



كان ضاغط بيتي لملء خزانات الغاز الطبيعي للسيارات قد استحدث من قبل شركة فيول ميكر (FuelMaker) المملوكة جزئياً من قبل شركة هوندا للسيارات في أميركا. وقد تم بيع عشرة الآف وحدة خلال السنة الأولى بمعدل سعري يبلغ 1000 دولار جو ماركيت (Joe Marquette)، أسوشيتد برس (Associated Press).

ويحدد المحتوى الحراري في معظم الأحيان أسعار أنواع الوقود الأحفوري المختلفة:

أسعار الوقود الأحفوري يوم 22 آذار/ مارس 2004	
نوع الوقود وموقعه	السعر (لكل مليون BTU) دولار
نفط خام، غرب تكساس نوع وسط	6,375
نفط الوقود الثقيل، ميناء نيويورك	4,033
نفط التدفئة، ميناء نيويورك	6,733
البروبان، مونت بيل فيو، تكساس	6,441
الإيثان، مونت بيل فيو، تكساس	6,259
غاز طبيعي، هنري هب، لويزيانا	5,960
فحم حجري، بيك ساندي، كنتاكي	2,525

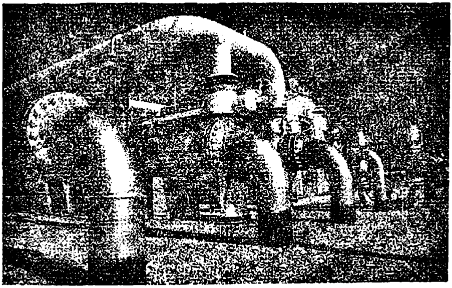
= كسوائل وتولد حرارة عالية جداً عند دخولها إلى غرفة الاحتراق مما قد يسبب آثاراً كالتي ذكرها المؤلف.

وتدعى هذه الأسعار بأسعار الإشارة لوقود من درجة قياسية محددة متوفر في موقع تجاري معترف به. وهناك نوعان من الأسعار: سعر فوري لبيع مباشر نقدي (كما في الجدول أعلاه) وأسعار مستقبلية لعقود التسليم في أوقات محددة. وتباع العقود وتشترى في الأسواق المستقبلية للمنتجات القياسية، من النفط إلى لحم الخنزير، مثل الأسهم والسندات. ويقوم المنتجون الرئيسيون والمستهلكون الرئيسيون أيضاً بتنظيم عقود خاصة. والسوق الفوري للغاز الطبيعي هو في هنري هب (Henry Hub) وهو مجموع أنابيب في جنوب لويزيانا يقع في منتصف الطريق بين نيو أورلينز وبومونت في أعماق مقاطعة كاجون. ويبدو أن الأسواق الفورية تقع أحياناً في أماكن غير معقولة، فالسوق الفوري للتبن المرزوم يقع في بيتالوما شمال سان فرانسيسكو وقرب الساحل، والسوق الفوري العالمي للنفط الخام يقع في ميناء روتردام في هولندا. ويكلف الفحم في جدول الأسعار الفورية نحو نصف أسعار الوقود الأخرى لنفس القيمة الحرارية. ولولا مشاكل التلوث الناجمة عنه لكان الفحم قد احتل موقع أنواع الوقود الأخرى.

ولا تتم المتاجرة بغالبية الغاز نقداً في سوق هنري هب الفوري، فأكثر من نصف الغاز يباع من خلال عقود، والعقود المستقبلية التي يتاجر بها بصورة علنية هي اتفاقات لبيع أو شراء عشرة ملايين BTU من الغاز الطبيعي في هنري هب في تواريخ مستقبلية تفصل بين الواحد والآخر فترة شهر. ويلجأ مستهلكو الغاز ومنتجوه إلى هذه العقود ليتفقوا على سعر محدد. وهناك إضافة إلى ذلك العقود التي تتم المزايدة عليها علناً للبيع أو الشراء المستقبلي. ويحب المضاربون هذه البيوعات، وهناك استراتيجيات متاجرة معقدة تحمل أسماء مثل: انتشار الثور، أو الفراشة الحديدية، أو مسكة الخنق القصيرة. ويقوم منتجو الغاز ومستهلكوه، وبخاصة محطات الكهرباء، وبطريقة أقل بهرجة، بوضع تفاصيل عقود محددة وإن

كانت غير قياسية وهي كذلك غير قابلة للبيع والشراء.

ورغم أن الغاز الطبيعي والنفط الخام السائل يظهران كمادتين مختلفتين جداً إلا أن أي حدود واضحة لا تتبين بينهما. إن أكثر المنتجات الوسطية المعهودة لدينا مخزونة في أسطوانات تحت طباخات الغاز في فنائنا الخلفي أو على ظهر العربات المقطورة التي نستخدمها في السفرات، ليست إلاّ غاز النفط المسيل، فالبروبان والبيوتان غازان يسيلان عند تسليط ضغط عليهما داخل خزان، وعند فتح الصمام يبدأ السائل بالتحول ثانية إلى بخار ويحرق البخار مثل الغاز الطبيعي.



تعتبر هنري هب (Henry Hub)، وهي مجمع لخطوط الأنابيب في لويزيانا (Louisiana)، موقع السوق الفوري لبيع وشراء الغاز الطبيعي وأساس تسعيره لمقاولات التجهيز المستقبلية. (لويل جورجيا (CORBIS (Lowell Georgia)

وتمتلك الجزيئات قرب قعر النافذة النفطية أربعاً إلى ست ذرات كاربونية. ويتباين ذلك مع ذرة كاربون واحدة، كما في غاز الميثان ومع ست إلى ثلاثين ذرة كاربون، كما في مختلف الجزيئات في النفط. وتدعى المنتجات الوسطية هذه غالباً بمكثفات الغاز الطبيعي

(Natural Gas Condensates) أو (NGL) للاختصار. وتدرج بعض الإحصائيات هذه المواد مع إنتاج النفط الخام بينما تعاملها إحصئيات أخرى كصنف قائم بذاته ويصادف أحياناً أنها تمر غير ملحوظة.

ولم تُعتبَر مكثفات الغاز الطبيعي قبيل 1971، عندما كانت هيئة السكك الحديدية في تكساس تقوم بتقنين إنتاج النفط، ضمن المواد النفطية، وقد تدفقت كميات هائلة من النقد نتيجة ذلك القرار البسيط. عرضت علي سنة 1962 عينات من صخور مكمن لحقل للمكثفات من الغاز في شرق تكساس. كان الصخر مسامياً إلى درجة بدا معها كأنه قماش مخرم. وتعجبت من المتانة التي امتلكها لكي يتحمل الطبقات الصخرية فوقه. ولأن الحقل لم يكن يخضع للتقنين، لعدم وجود تقنين على مكثفات الغاز، فقد بينت الشركة أن الحقل لم يكن بقرة تدر النقد بل كان نهراً يتدفق منه النقد.

وكان هناك قصص في الصحف والمجلات عبر السنين العشرين الماضية تبحث في إمكانية تسرب الغاز من مصادر غير عضوية في أعماق الأرض. وقد دافع الأستاذ توماس غولد (Thomas Gold)، وهو فيزيائي فضاء من جامعة كورنيل، عن نظرية الأصل غير العضوي للميثان، ونجح سنة 1986 في إقناع الحكومة السويدية لتحفر بئراً عميقة تحت محل سقوط نيزك متحجر، ولم يظهر أي غاز. وقد ادعى ج. ف. كيني (J. F. Kenny) في هيوستن وثلاثة زملاء روس له، مؤخراً أن الغاز وحتى النفط لهما أصول غير عضوية[2]. وإذا كانت هذه الادعاءات صحيحة، فيمكن أن تكون

---

(2) انظر: J. F. Kenney [et al.], «The Genesis of the Hydrocarbons and the Origin of Petroleum,» *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 99 (2002), pp. 10979-10981.

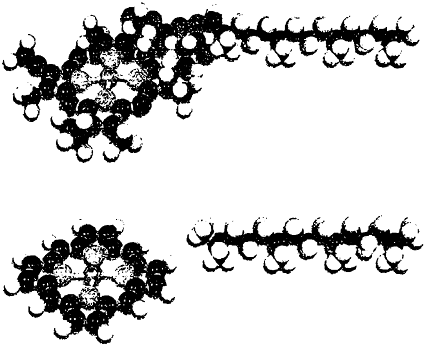
هناك مصادر مهمة للغاز الطبيعي في مواقع لا يعيرها جيولوجيو النفط أي اهتمام.

بالنسبة لي يبدو كأمر بديهي تماماً أن الغاز الطبيعي هو المنتوج النهائي لعملية التكسر الحراري التي تولد الضغط. وهناك جزيئات في النفط ذات تشابهات يسهل تمييزها للمواد العضوية وتدعى أحياناً بالمتحجرات الجزيئية، فجزيئات البروفايرين (prophyrin) في النفط الخام شبيهة جداً بالكلورفيل في النباتات. ولا من مجال لتطبيق أسلوب المتحجرات الجزيئية على الغاز الطبيعي، وذلك لأن الميثان ذو جزئية صغيرة وبسيطة. وهذا ما ترك نافذة مفتوحة للادعاء بأن الغاز الطبيعي كان منتوجاً غير عضوي يهاجر إلى الأعلى من أعماق الأرض. وقد بحثت دراسة فائقة الأهمية لكنها لم تُعَرْ إلا القليل من الاهتمام في حينه عن الغازات التي يحتمل أنها هاجرت إلى الأعلى من أعماق الأرض. ومنجم النحاس العميق في كيدكريك في أونتاريو ذو صخور قديمة جداً وصلبة جداً. والإشارة التي تسجلها غازات المنجم للنظير الكاربوني لا تشابه لها مع الغاز الطبيعي من الآبار المنتجة تجارياً[3]. وتشير الملاحظات في كيدكريك بالنسبة لي إلى أن لا أمل في إيجاد مصادر وفيرة للغاز الطبيعي في الصخور الصلبة العميقة.

إن ادعاءات كالتي جاء بها غولد وكيني توفر معضلة للعلماء، فعلى العلم أن يكون منفتحاً على الأفكار الجديدة، فالثورات العلمية الرئيسية نمت من جذور كانت تبدو في الأصل غير قابلة للتصديق.

(3) انظر: B. Sherwood Lollar [et al.], «Abiogenic Formation of Alkanes in the Earth's Crust as a Minor Source for Global Hydrocarbon Reservoirs,» *Nature*, vol. 416 (4 April 2002), pp. 522-524.

ورغم ذلك، فالمقارنة بكل فكرة غير تقليدية تحقق الاف الاقتراحات التي تبدو جنونية، لأنها في الحقيقة جنونية فعلاً. وليس بإمكان العلميين الممارسين قضاء جلّ وقتهم للنظر في ما هو خارج المألوف. ويصرخ بعض غير التقليديين لسوء الحظ قائلين إننا خائفون من التفكير في إمكانية كوننا مخطئين وكونهم محقين. ونقوم بإنجاز أعمالنا الاعتيادية. وسبب ذلك، جزئياً، أن نفراً من الشجعان حاربوا معارك علنية. وتشمل قائمة الشرف التي أعددتُها كلاًّ من مارتن غاردنر (Martin Gardner) وجيمس راندي (James Randi) وكارل ساغان (Carl Sagan) وسيسيليا باين - كبوشكين (Cecilia Payne - Gaposhkin).



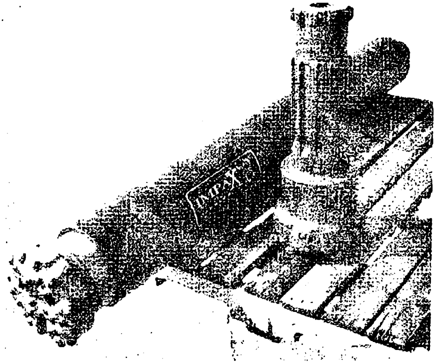
يبين الشكل الأعلى نموذجاً لجزيئة كلوروفيل كما تنتجها النباتات الطبيعية. ويبين الشكل السفلي جزأين ناجمين عن تفكك الكلوروفيل كما نجدها في النفط الخام. وقد استخدم اللون الأسود لذرات الكاربون والأبيض لذرات الهيدروجين والرمادي للأكسجين والنايتروجين.

حفرت أول بئر غاز ناجحة في ولاية نيويورك سنة 1821، أي قبل خمسة وثلاثين سنة من بئر دريك النفطية الشهيرة في شمال بنسلفانيا. وتنتج آبار الغاز الحديثة في نفس المنطقة على الأغلب من طبقات الحجر الرملي على أعماق تراوح بين 2000 و5000 قدم. ويتم حفر الآبار بسرعة نسبية وبكلفة قليلة (تبعاً لمعايير صناعة النفط)، وذلك باستخدام مطرقة تعمل داخل البئر بواسطة الهواء المضغوط. وتشبه هذه المطرقة ذلك النوع من المطارق شديدة الضجيج التي يستخدمها مقاولو البناء. وإذا ما تم اكتشاف رمال حاوية على الغاز يصار إلى ضخ الماء في البئر تحت ضغوط عالية لإحداث تصدعات تمتد من ثقب البئر. وتدعى العملية هذه بالتصديع المائي (Hydrofracturing) أو للاختصار (Frac) فقط. وتعدّ كل من آبار نيويورك وبنسلفانيا مواقع مرغوبة لإنتاج الغاز، فهي قريبة إلى مستهلكي الغاز، كما أن كُلَفَ حفر الآبار معقولة، مما يجعل الآبار الصغيرة اقتصادية. وجاء العون الآخر لمنتجي ومستهلكي الغاز في الثمانينيات عندما أعلنت المحاكم أن خطوط أنابيب الغاز تقع ضمن قطاع الملكية العامة. وكان الغاز الطبيعي كله سابقاً يشترى عند الآبار من قبل شركات خطوط أنابيب الغاز. وحصلت شركات خطوط الأنابيب على أرباح من شراء وبيع الغاز، كما حصلت على أجور عن نقل الغاز. أما الآن، وبعد أن أصبحت أنابيب الغاز وسائل نقل عامة، فبإمكان مشغلي آبار الغاز بيع الغاز مباشرة إلى المستخدمين النهائيين وستتقاضى خطوط الأنابيب أجرة مقطوعة عن نقله.

لقد تيسّر لي، لحسن الحظ، تنبيه مسبق حول أحد مخاطر العمل الاستشاري في قطاع النفط والغاز. كنت أنتظر دوري في صف للحصول على الغذاء في اجتماع نفطي، وكان رجلان أمامي يناقشان برنامج حفر فاشل. «سنقاضي الجيولوجي أيضاً. قد يكون لديه تأمين

ضد التقصير في عمله». ولم أكن أمتلك مثل هذا التأمين. وكان تحليلي المنطقي يقول إن الشخص يقدر أن يقاضيك عن الإهمال لكن إذا ما أعطيتُ تفسيراً معقولاً مستنداً إلى ملاحظات واقعية، فسيكون من الصعب جداً مقاضاتي، لكوني بكل بساطة مخطئاً فقط. كان لي فرصة في بداية الثمانينيات لتقديم المشورة حول سلسلة من مشاريع الحفر عن الغاز الطبيعي في غرب بنسلفانيا وفي نيويورك، وكانت كتب التوصية الرسمية التي احملها لبرامج الحفر طويلة ومملة لكنها لم تتطرق إلى الإهمال.

وكانت مكامن الغاز في الحجر الرملي في غرب نيويورك وفي بنسلفانيا مترسبة بالتوازي مع خطوط الساحل القديمة التي تأخذ اتجاه الشمال الشرقي ـ الجنوب الغربي. لذا فقد كان موقع الحفر الجيد إلى شمال شرق أو جنوب غرب بئر منتجة (والموقع المجاور إلى بئر موجودة تدعى البئر المُزاحة (Offset Well). وساعدت إحصائيات الإنتاج والسجلات التي أخذت في قعر البئر في تحديد الآبار الجديدة الأكثر ربحية. وتدير حكومة ولاية نيويورك في مدينة أولين مكتبة عامة ممتازة تتواجد فيها سجلات الآبار ومعلومات الإنتاج الأولى ويمكن استنساخها بالتصوير. وكان اختيار مواقع الحفر المثلى قضية صبر أكثر مما هي قضية مهارة.



نوع من مثاقب البناء العاملة بالهواء المضغوط ذو حجم كبير يمكن استخدامه لحفر الآبار. ويعمل المثقب في قعر البئر من خلال دك لقمة ذات كريات مصنوعة من كاربيد التنكستن. ويعتبر استخدام هذا المثقب الطريقة الأرخص للحفر لحد عمق خمسة آلاف قدم في الصخر الصلب وبغياب تدفق كبير للماء في البئر (سماح من سميث بتس (Smith Bits)).

إن حفر آبار الغاز التقليدية عمل يومي جيد، لكن بعض برامج الحفر تعطي الفرصة لحفر بئر كبيرة مربحة فعلاً. عُثِر في أحد برامج الحفر التي كنت استشارياً فيها على مثل هذه البئر، وكانت أكبر منتَج في تاريخ ولاية نيويورك. وهناك بامتداد الحافة الشمالية للطبقة الملحية تحت السطحية ثنية (fold) تشبه تجعداً في حافة سجادة. وكانت الثنية والغاز والنفط المحتبسين فيها قد اكتشفت صدفة. وكأن الصدفة حادثة فعلية، فالحفارون لم يكونوا يتوقعونها وقد فقدوا برج الحفر في النار التي نشبت نتيجة ذلك. وقد حدد أحد برامجي بئراً على مسافة أبعد على امتداد الثنية، وكان الحفار واعياً بالمشكلة لكنه

لم يربط مانع الانفجار. وما نتج كان انفجاراً وإهمالاً ومقاضاة. ولكن لم يكن هناك حريق لحسن الحظ، وقد أعيدت السيطرة على البئر في اليوم الثاني، وكان هناك العديد من المستثمرين السعداء.

الغاز غير التقليدي

هناك عدد من مصادر الغاز الطبيعي غير التقليدي، كان جميعها معروفاً لثلاثين سنة وبعضها منذ قرون، وهي مصادر غير تقليدية حقيقية، لأن أسعار الغاز المرتفعة قد جددت الرغبة في استثمارها تجارياً. والمصادر الأربع الأولى في هذا القسم مفيدة لكن لا يتوقع أن تكون كبيرة بما فيه الكفاية لإنقاذ سوق الغاز الطبيعي في أميركا الشمالية. أما الفقرة الأخيرة، وهي بلورات الغاز المائية، فيمكن أن تكون كبيرة لكن حقل بلورات الغاز المائية الوحيد حالياً في العالم لا ينتج إلا بطريقة متقطعة.

غاز المستنقعات

باستطاعة أنواع مختلفة من الباكتيريا أن تحول المادة العضوية إلى ميثان. والباكتيريا ليست نادرة أو غريبة النوع، فكلنا نحملها في أمعائنا. أما في الأرض، فالباكتيريا تولد الميثان من جذور الحشائش نزولاً إلى درجة الحرارة حيث لا يمكن للباكتيريا أن تعيش فيها. وكان الاعتقاد السائد لغاية سنة 1967 إن كل أنواع الباكتيريا تموت في درجة حرارة تعقيم الحليب البالغة 145° ف (62.8° س). لكن بعض أنواع الباكتيريا على أي حال تحب الحرارة العالية، مما ولّد إرباكاً في التعريف. ويشك كل عامل سابق قد اتسخت يداه في النفط أن غالبية الباكتيريا المنتجة للميثان هي من النوع الاعتيادي الذي يموت بعد نصف ساعة من التعرض لدرجة حرارة البسترة. وتعنى التسمية غير الرسمية «غاز المستنقعات» بتجمعات الميثان فوق

المستنقعات التي تنتجها هذه الباكتيريا التي تعيش في درجات الحرارة الاعتيادية. وربما تكون لمعات الضياء الغريبة والمنتشرة التي تُرى فوق المستنقعات ناجمة عن ميثان يحترق.

ويمكن للطبقات الضحلة من الصخور الرسوبية في أعماق أعلى من النافذة الحاوية للنفط أن تحوي تراكمات من الغاز المولد من قبل الباكتيريا في حقول غازية مجدية تجارياً. وأكثر الأمثلة التي تمت دراستها نجدها في صخور العصر الطباشيري (Cretaceous Period) (يتراوح عمرها حول 100 مليون سنة) في مونتانا وألبرتا، رغم أن ذات الأمثلة موجودة في كافة أرجاء العالم. ولم يكن أي من الحقول كبيراً بما فيه الكفاية لجذب انتباه شركات النفط الكبرى، لكن العمق الضحل والتكلفة البسيطة تجعل استخلاص الغاز ذي الأصول الحيوية أمراً مجزياً للشركات الصغيرة ولأقطار العالم الثالث.

الغاز من أحواض الفحم

لقد توفي العديد من عمال المناجم بسبب انفجار الميثان في مناجم الفحم. وكان مصباح ديفي للسلامة ـ وطيور الكنار ـ يُستخدمان لتحسس كل من الميثان ومستوى الأوكسيجين الواطئ. وكانت آبار قد حفرت منذ ثلاثينيات القرن العشرين في أحواض الفحم المشبعة بالغاز لإنتاج الميثان بكميات تجارية. وكان هناك، بدءاً بالثمانينيات، توسعٌ في تطوير استخلاص الغاز الطبيعي من أحواض الفحم. وقد ساعد محفز خفض الضرائب وقتياً في تدشين البرنامج.

والفحم ذاته هو مصدر للغاز، فدفن بعض أنواع المواد العضوية (وبخاصة من الأشنات البحرية) يولد في التنقيب التقليدي عن النفط كميات وفيرة منه، لكن المواد النباتية (كالأوراق وسيقان الأشجار وما

يقطع من الأعشاب) يؤدّي بخلاف ذلك إلى توليد كميات قليلة من الميثان فقط ولا تولد أي نفط. ويعتبر الميثان من الأحواض الفحمية مصدراً مهماً للغاز الطبيعي بسبب كون حوض الفحم ليس إلا تجمعاً كبيراً من المواد النباتية[4].

لقد مثل غاز أحواض الفحم اعتباراً من سنة 2000 نحو 8٪ من مجمل إنتاج الغاز الطبيعي في الولايات المتحدة. وتستخرج نسبة ملحوظة من مجمل غاز الأحواض الفحمية، كما يحدث في معظم الأوقات مع المصادر الطبيعية، من مناطق الحجر الكلسي. وقد ساهم حوض سان خوان في نيومكسيكو وكولورادو بنحو 80٪ من غاز الأحواض الفحمية. وينتج ممر سالك أو بقعة مثمرة قياسها نحو عشرة أميال في أربعين ميلاً عبر حدود ولايتي نيومكسيكو وكولورادو الآن 70٪ من مجمل إنتاج الولايات المتحدة من غاز الأحواض الفحمية. لكن إنتاج الغاز من الحوض الفحمي من حوض باودر ريفر (Powder River Basin) في شمال شرق وايومنغ ينمو بسرعة وقد يتجاوز إنتاج حوض سان خوان عما قريب.

---

(4) انظر: Rosalind Franklin, «The Study of the Fine Structure of Carbonaceous Solids by Measurement of True and Apparent Densities: Part 1, Coals,» *Transactions of the Faraday Society*, vol. 45 (1949), pp. 274-286.



ابتكر همفري دايفي (Humphrey Davy) سنة 1815 مصباح اكتشاف الغازات السامة والمتفجرة في مناجم الفحم. ولاتزال هذه المصابيح التي تعمل بحرق الزيت تصنع وتستخدم حتى اليوم. والخزآن في أقصى اليسار من المصباح المفكك على المنضدة هي أردية مصنوعة من مشبك معدني تحيط باللهب. وكان ديفي قد اكتشف أن الشبكات المعدنية منعت انتشار الانفجار بعيداً عن لهب المصباح. وكان اللهب يخفت في «الهواء الفاسد» (وهو عادة ثاني أوكسيد الكاربون). وبوجود الغاز الطبيعي (الميثان) كان اللهب يطول ويغير لونه (Culver Pictures).

غاز وسط الأحواض

إن البحث الاعتيادي عن النفط والغاز هو البحث عن مصيدة أو موضع يطفو النفط والغاز فيه فوق المياه الجوفية لكنه لا يستطيع الهجرة إلى السطح. ويكون الغاز في بعض المناطق مبذولاً إلى درجة بحيث تكون المسامات في صفيحة كاملة من الصخور مملوءة بالغاز الذي يكون قد أزاح الماء. مرحى! لا داعي لإجهاد النفس بحثاً عن المصائد المحلية للنفط والغاز، ابحث فقط عن العروق الأسمك

والأكثر مسامية في الصخر المضيف. كانت برامج الحفر التي قدمت المشورة له في الثمانينيات في نيويورك وبنسلفانيا قد نفذت في الطرف الشمالي لطبقة مشبعة بالغاز امتدت جنوباً حتى ولاية تينيسي، رغم عدم إدراكي ذلك في حينه. وتوجد تراكمات غاز مهمة أخرى في وسط الأحواض في جنوب غرب وايومنغ وفي شمال غرب نيومكسيكو.

إن روعة الحصول على طبقة كاملة مملوءة بالغاز الطبيعي تأتينا وهي تحمل معها معوقاً، إذ لا يبدو أن هناك ما يكفي من الغاز أو النفط لتشبيع صخرة مكمن كبيرة وسميكة وذات مسامية عالية. لكن الطبقات الصخرية الأقل سمكاً والأقل مسامية هي التي تمتلئ بالغاز بصورة كاملة. إن سهولة تدفق الموائع هي على وجه التخصيص أوطأ عدة، وهي بالتعبير الصحيح صخور ذات نفاذية واطئة. أما في لغة النفط العامية فهي رمال كتيمة. والتصديع المائي للمكامن ذات النفاذية الواطئة، وبدون اختلاف، أمر جوهري تقريباً لضمان النجاح الاقتصادي لآبار الغاز في الرمال الكتيمة. لقد كان هناك في زمن ما حافز سعري في الولايات المتحدة لتشجيع إنتاج الغاز من الرمال الكتيمة. وهناك اليوم حافز ضريبي أكثر تواضعاً للآبار التي تنتج أقل من 90000 قدم مكعب من الغاز يومياً.

إن قرار حفر ـ أو عدم حفر ـ بئر غازي يمثل مفارقة مشوقة، فهو لكي نعرضه ببساطة لعبة لتقرير متى يكون طير في اليد خير من طيرين على الشجرة، فمع إدراك أن حفر بئر استشكافية للنفط أو الغاز هي عملية محفوفة بالمجازفة، حاول أن تتابع التجربة الفكرية التالية: تجد نفسك جالساً على رأس منضدة اجتماعات كبيرة في اجتماع تحضره كل شركات النفط والمستثمرين المستقلين، وهناك أمامك ملفات يصف كل منها فرصة حفر استكشافية خلال السنة

2005، وكنت قد رتبت الملفات واضعاً تلك التي ستولّد أعلى نسب مردودات على رأسها. تضع أولها على المنضدة وسرعان ما يختطف. ومع هبوطك خلال الملفات تصبح المزايدة فاترة. وعند نقطة معينة يعتقد الكل حول المنضدة إما أن بقية الإمكانيات لا قيمة لها، أو أنها خادعة. وسرعان ما تنتهي المزايدة، وتكون قد حددتَ تجريبياً نسبة المردودات المطلوبة لجذب رأس المال في عملية حفر الآبار. وهذه النسبة حسب الممارسة الحالية تقع بين 10 و15 بالمائة في السنة.

ويحاول المستثمر، في أكثر الحالات تكاملاً في تطويرها، أن يخمن القيمة الحالية المتوقعة للتدفقات النقدية المستقبلية المخصومة. دعنا نفصل ذلك.

- تقر «القيمة المتوقعة» بأن بعض هذه الإمكانيات ستكون آباراً جافة، وأن بعضها ستكون قليلة الإنتاج وكثيرة أو غزيرة الإنتاج. ويقدر المستثمر، بناء على خبرته، بأن مائة من إمكانيات مشابهة قد أعطته خمساً وسبعين بئراً جافة وثمانية عشر حقلاً ينتج الواحد منها مليار قدم مكعب وخمسة حقول ينتج الواحد منها عشرة مليارات قدم مكعب وحقلين ينتج الواحد منها مائة مليار قدم مكعب من الغاز.

- يقر «التدفق النقدي» بأن كل النقود سوف لا تصرف في اليوم الأول، وأن الاستثمار قد يتوزع عبر بضع سنوات، كما أن بعض المردودات قد تستغرق سنين لتتحقق، فكر بها كحساب مصرفي خيالي ذي رصيد سلبي من النقود المدانة في السنوات المبكرة، وهناك نقطة تساو أو سنة استعادة الاستثمار في الوسط، ومن ثم رصيد إيجابي في السنوات التالية.

- إن «الخصم» يعتمد نسبة فائدة لتحويل الدفعات في السنوات المستقبلية إلى قيمتها الحالية.

ويقوم المستثمر، كقعدة، بمعالجة الأرقام ويقرر فيما إذا كان سيستثمر في هذه الفرص للحفر، كما يقوم العديد من الناس ذوي الخبرة في اللعبة النفطية باحتساب تقريبي في أذهانهم في ثوان قليلة.

إن الهدف من هذا التوضيح هو أن حقول الغاز لوسط الأحواض تختلف من حقول الغاز التقليدية من حيث امتلاكها احتمالات كبيرة جداً للنجاح وامتلاكها تدفق نقدي بسيط. وتبدو آبار الغاز في الأحواض الوسطى كاستثمار شبيهة بالسندات الاتحادية أكثر من شبهها بأسهم شركات التكنولوجيا الحيوية.

حجر السجّيل المتصدّع

كان أول استخراج للغاز الطبيعي التجاري في الولايات المتحدة من حجر السجّيل المتصدع (Fractured Shale) أو الحجر الطيني (Mudstone) في أعالي ولاية نيويورك. وكانت الآبار المحفورة هناك سنة 1821 تغذي الإنارة في شوارع فريدونيا قبل ثمانٍ وثلاثين سنة من اكتشاف دريك لأول بئر نفطية. ورغم تاريخه العريق إلا أن إنتاج الغاز الطبيعي من السجّيل المتصدع لا يزود سوى 2٪ من حاجة الولايات المتحدة.

والنفاذية، أي سهولة تدفق الموائع، كما ذكرنا سابقاً، أقل في الصخور ذات الحبيبات الدقيقة. والحالة أسوأ مما يُسمع: فتقليل حجم المسامات إلى النصف يقلل النفاذية بعامل يبلغ الأربعة. أما تقليل حجم المسام بعامل يبلغ عشرة، فسيقلل النفاذية بعامل يبلغ مائة. وتعتمد النفاذية بصورة عامة على مربع حجم الحبيبة. قارن الحجر الرملي، الذي يبلغ قطر حبيبة الرمل فيه مليمتراً واحداً، مع حجم السجُيل الذي يبلغ حجم الحبيبة فيه مايكروناً واحداً. وحيث

إن نسبة الحجم تبلغ ألف إلا أن الفرق في النفاذية يبلغ ألف تربيع، أي أن النفاذية تزيد مليون مرة في الحجر الرملي عما هي عليه في السجّيل. وتدفق الغاز خلال السجّيل ذاته بطيء جداً إلى درجة لا تعطيه أي قيمة تجارية. أما إذا كان السجّيل على أي حال ذا مجموعة طبيعية من التصدعات، فإن هذه التصدعات تحتوي على الغاز ويمكنها نقل الغاز الذي تطلقه كتلة السجّيل ببطء.



إنارة الشوارع بواسطة اللهب المكشوف في مدينة فيندلاي (Findlay) بولاية أوهيو (Ohio) سنة 1855. وكانت الإنارة بواسطة فتيلة الغاز (gas mantle) الأكثر كفاءة قد اخترعت في أوروبا في ذات السنة (كلفر بكتشرز (Culver Pictures))

وهناك في عالم النفط معادلات لمكامن غاز السجّيل المتصدع، فحقل سبرابيري الشهير (أو بالأحرى سيئ الصيت، لأنه لم يكن في الحقيقة مربحاً بذلك القدر) في غرب ولاية تكساس، يغطي ثلاث مقاطعات، وينتج النفط من خلال تشققات طبيعية في الحجر الغريني (Siltstone). والحجر الغريني، كما يوحي بذلك الاسم له حبيبة ذات حجم وسطي بين الحجر الرملي والحجر الطيني. وقد كان هناك عدد كبير من الآبار في حقل سبرابيري التي كانت بالكاد مربحة.

وفي طريق الانحدار نزولاً من ذروة هابرت، سيكون كل مقدار ضئيل مفيداً بما في ذلك الغاز من حجر السجّيل المتصدع. لكن السجّيل المتصدع ليس على أي حال مرشحاً لتقديم الحل للجزء الأكبر من متطلباتنا للطاقة.

بلورات الغاز المائية

إن هذه البلورات شيء أكبر من «كل مقدار ضئيل». ولم ينتج من هذه البلورات حتى الآن إلا مقدار قليل جداً من الغاز، يضاف إلى ذلك عدم وجود منهجية لاستخلاص الغاز من البلورات. ويقدر بعض الخبراء حجم الغاز في هذه البلورات بنحو مائة ضعف كافة احتياطيات الغاز التقليدية، رغم بروز بعض الشك حول ذلك مؤخراً[5].



بلورات الغاز الطبيعي المائية وكانت قد استخرجت من على قاع البحر قرب أوريغون (Oregon). والجزء الأبيض هو البلورات المائية أما الجزء الأسود فهو الشوائب من الرواسب المطمورة في البلورة. والخلفية هي قفاز من النسيج.

(5) انظر: E. Dendy Sloan, *Clathrate Hydrates of Natural Gases* (New York: M. Dekker, 1990), pp. 464-474.

وتعرف بلورات الغاز المائية (Gas Hydrates) باسم بلورات الغاز القفصية (Gas Clathrates) أيضاً، وهي جزء من عائلة واسعة من المواد الصلبة المتبلورة الناجمة عن تجمد مزيج من الماء والغاز. والجزيئة السائدة هي الغاز الطبيعي أو الميثان، وهي واحدة من نحو دزينة من أنواع الجزيئات التي يعرف أنها تشكل بلورات قفصية مع الماء. وتشمل هذه النايتروجين والأوكسيجين وكبريتيد الهيدروجين وثاني أوكسيد الكاربون والكلور والكلوروفورم، وحتى الغازات الخاملة، مثل الأرغون والزينون. وتحوي بلورات الغاز المائية أربع جزيئات ميثان وثلاثاً وعشرين جزيئة ماء. ويمكن كشيء جانبي القول إن هذه البلورات تحقق التعريف الرسمي للمادة المعدنية (Mineral): أي تلك الموجودة في الطبيعة، وذات بنية بلورية محددة. وقد يرغب أحد قراء هذا الكتاب أن يتجشم عناء إعطاء اسم علمي مناسب لمادة معدنية، مثل كفينفولدنايت (Kvenvoldenite) لهذه البلورات.

وكان أول أنواع البلورات المائية المكتشفة يحوي غاز الكلور وذلك سنة 1810. وكانت بلورات غاز الميثان تعتبر خلال عقدي الثلاثينيات والأربعينيات مصدرَ إزعاج يعمل على إعاقة جريان الغاز ذاته في الأنابيب. وبدأت بعض الإشاعات تنتشر في حدود سنة 1970 عن مخزون كبير من بلورات الغاز تحت الجليد الدائم في المنطقة القطبية الشمالية وتحت الأجزاء الخارجية من مياه الجرف القاري. وكانت بدايات ثقافتي حول الموضوع من خلال محادثة رباعية في حفلة كنت وديك هولاند (Dick Holland)، أحد أعضاء الهيئة التدريسية الآخرين في برنستون، نتبادل القليل الذي نعرفه من هذه الإشاعات بصوت مسموع، عارفين أن الشخصين الآخرين في مجموعتنا كانا يصغيان مع ابتسامة عريضة. وكان هذان الشخصان هما هوليس هيدبرغ (Hollis Hedberg) من شركة غلف أويل، وكرايتون

بيرك (Creighton Burke) من شركة موبيل، اللذان لم يستطيعا البقاء ساكتين، فبدآ يقصان علينا القصة الحقيقة:

إن بلورات الميثان المائية الموجودة تحت سطح الماء مهمة بطرق تختلف عن مجرد كونها مصدراً للطاقة، فهي غير مستقرة في الضغط ودرجة الحرارة العاديين، لذا فإن أي انخفاض لمستوى سطح البحر، أو زيادة في الحرارة قد تطلق غاز الميثان منها. وقد عُزِيَتْ بعض الانهيارات في قاع البحر إلى انطلاق الميثان. والأهم من ذلك أن غاز الميثان هو من مسببات الدفيئة العالمية ويفوق تأثيره التأثير الناجم عن غاز ثاني أوكسيد الكاربون بمرات، وأن أي حدث جيولوجي بسبب هبوط مستوى سطح البحر أو زيادة في درجة الحرارة التي تتعرض لها الرواسب الواسعة من هذه البلورات قد يسبب دفئاً عالمياً شديداً.

وهناك موقعان مختلفان يحوي كل منهما مخزوناً كبيراً من بلورات الميثان المائية وهي:

ـ على مستوى عال على الأرض، فترسبات الماء المتجمد ـ أي الجنيد الدائم (permafrost) ـ والممتدة من السطح إلى أعماق تصل من 600 إلى 3000 قدم، تحوي على الأغلب تحت الجليد الدائم على طبقة من بلورات الميثان المائية. وهذا يحدد الاستخراج أوتوماتيكياً إلى نصف الكرة الشمالي، لأن الموقع الوحيد الملائم في نصف الكرة الجنوبي هو القارة القطبية الجنوبية. ولسنا بصدد استخراج موارد هذه القارة حالياً.

ـ الجزء النائي من الجرف القاري على أعماق بين 2000 و8000 قدم يحتوي أيضاً على هذه البلورات. والكمية الكلية للميثان في هذا الموقع يمكن أن تمثل عشرة أضعاف الخزين القاري.

ويمتد مخزون بلورات الميثان تحت سطح البحر من القطبين وحتى خط الاستواء لسبب وجيه، فالجزء الأكبر من المحيط اليوم مملوء من القعر صعوداً بماء أكثر كثافة بسبب محتواه الأعلى قليلاً من الملح، ومبرَّد إلى بضع درجات فوق درجة الانجماد. (الناتج العَرَضي الغريب: عندما التحقت بقسم علوم المحيطات في جامعة ولاية أوريغون كن أول ما أخبروني به: لا تذهب للسباحة!، فقبل فترة وجيزة كان أحد أساتذة اللغة الإنجليزية قد وصل حديثاً وذهب إلى الساحل قبل فصل الخريف الدراسي وقفز في الماء، ولم يظهر ثانية، فرياح الصيف تقوم بنزع الماء الدافئ بعيداً لتظهر مكانها مياه حرارتها لا تزيد عن 39° ف أو 4° س). وهناك على الجرف القاري النائي لساحل أوريغون موقع غير مألوف تكون بلورات الغاز فيه مكشوفة للنظر على قاع البحر، وهو موقع يدعى الآن «سلسلة البلورات المائية» (Hydrate Ridge)، حيث تلاحظ كتل من بلورات الميثان مع بعض الترسبات المشبعة بالبلورات طافية على سطح البحر. وقد أظهرت دراسة مفصلة حديثة لسلسلة البلورات المائية مع انعكاسات للمعلومات الزلزالية، ومع حفر تسع آبار سَبْر، أن مناطق بلورات الغاز أخف سمكاً، وهناك عدم استمرارية أكبر فيما بينها مما كان متوقعاً[6].

وقد كان المصدر التجاري الوحيد لغاية يومنا هذا لهذه البلورات هو حقل ميسوياخا (Messoyakha Field) في شمال القسم الأوسط من سيبيريا، والذي كان إنتاجه متقطعاً، بعد أن بدأ الإنتاج

(6) انظر: A. M. Tréhu [et al.], «Three-Dimensional Distribution of Gas Hydrate Beneath Southern Hydrate Ridge: Constraints from ODP Leg 204,» *Earth and Planetary Science Letters*, vol. 222, Issues 3-4 (15 June 2004), pp. 845-862.

فيه سنة 1969، إذ كان آنذاك مكمن غاز تقليدي يقع تحت طبقة من بلورات الغاز مباشرة. لكن ضغط الغاز في المكمن لم يهبط بالسرعة المتوقعة خلال الإنتاج، لذا فقد بدا واضحاً أن المكمن كان يُعزَّز بتحلل البلورات المائية. ولم يصبح حقل ميسوياخا على أي حال ورغم بضع محاولات منتجاً رئيسياً للغاز، وظل إنتاجه الإجمالي منذ سنة 1980 أقل من مليون قدم مكعب في اليوم. وللمقارنة، فإن إنتاج بئر غاز واحدة متوسطة الحجم في تكساس يبلغ مليون قدم مكعب في اليوم.

لقد كرس بعض التفكير لطرق استخلاص الغاز من هذه البلورات، وذلك بسبب انتشارها الواسع في العالم. ويعتمد تكون بلورات الميثان على الحرارة الواطئة والضغط العالي والماء. والأساليب البديهية لتفتيت البلورات لغرض استخلاص الغاز هي إما رفع درجة الحرارة أو خفض الضغط أو «سرقة» الماء. ولكل طريقة سلبياتها وإيجابياتها.

التسخين: كان أول الهموم يتعلّق بتفتيت البلورة، وبما إذا كان ذلك يحتاج من الطاقة ما يفوق الحرارة التي سنحصل عليها من حرق الغاز المتحرر. لكن لا داعي للقلق، فالطاقة المطلوبة هي 7٪ فقط من محتوى الطاقة عند حرق الغاز المتحرر. والبديل المشوق هو تسخير الحرارة الأرضية لهذا الغرض، ففي أي موقع تقريباً بما في ذلك المناطق القطبية تنتج الآبار العميقة المحفورة في الصخور الرسوبية ماء ساخناً. ويحتاج توليد الكهرباء بواسطة حرارة جوف الأرض ماء يقارب الغليان. لكن استخلاص الميثان يتطلب رفع الحرارة بمقدار 10^{o} ف فقط. والخلاصة أن الحرارة الأرضية واطئة النوعية تكفي، وإيجاد مصدر حراري أمر سهل على أي حال مقارنة بتوزيع الحرارة في الطبقة الحاوية على بلورات الغاز. إن المجال

المسامي الاعتيادي في الرسوبيات مسدود بواسطة هذه البلورات ذاتها. لذلك، لن يفيد الحقن البسيط للسوائل لساخنة في طبقة البلورات.

خفض الضغط: إذا ما وُجد مكمن تقليدي للغاز تحت طبقة بلورات الغاز المائية مباشرة، فسيساعد إنتاج الغاز التقليدي على بدء عملية تفتت البلورات. ويبدو أن هذه هي آلية الإنتاج في حقل ميسوياخا. وما أن يتناقص ضغط المكمن إلى حد معين يساعد على تفتت بلورات الميثان، فلن يكون هناك فرق ضغط كاف لدفع الغاز إلى الآبار المنتجة. وقد استخدمت مضخات التفريغ في حالات معينة على آبار الغاز التقليدية المستنفدة تقريباً. لكننا مع ذلك نعتمد على الآف الباوندات على الإنش المربع لتحريك الغاز في المكمن، ولن توفر مضخة الفراغ، حتى إذا كانت من نوعية مثالية، سوى 14,7 باوند على الإنش المربع من الضغط الإضافي.

سرقة الماء: أعط البلورات خياراً كيميائياً وسيجتذب الماء بقوة أكبر حتى من الميثان. ونحن بصورة عامة نبحث عن «مانع تجمد» (Antifreeze)، رغم أن معظم المواد المرشحة لن تلائم الاستخدام في مشعات السيارات. وكانت أول خبرة قد حصلت من إزالة هذه البلورات من خطوط الغاز التي كانت تسدها، وأصبح الميثانول (أي كحول الخشب، وهو سائل سام) خياراً مرغوباً لتنظيف خطوط الأنابيب. لكن عشر محاولات لتحفيز آبار حقل ميسوياخ بواسطة حقن كتل يبلغ حجمها ألف غالون من الميثانول، لم تزد من إنتاج الغاز بصورة ملحوظة. ومانع التجمد الآخر هو محلول ملحي يحضر من أي ملح شديد الذوبان في الماء. واستخدم في إحدى المحاولات في ميسوخايا محلول مركّز لكلوريد الكالسيوم مع الميثانول، لكن النتائج مع الميثانول لوحده كانت أفضل. والمساعدة الطبيعية الأخرى

الممكنة: بعض محاليل الأملاح من حقول النفط العميقة وهي محاليل مركزة لكلوريد الصوديوم وكلوريد الكالسيوم. ومن الممكن استخدامها لتفتيت بلورات الغاز المائية.

وبلورات الغاز المائية اليوم تعتبر فرصة لأحد الشباب ليصبح أغنى من بيل غيتس، فحقول البلورات المعروفة أكبر من جميع موجودات العالم من النفط والغاز(*) والفحم مجتمعة، رغم أن الدراسة المفصلة التي أجريت مؤخراً على سلسلة البلورات مقابل ساحل أوريغون تثير إمكانية كون التقديرات العالمية لهذه البلورات مفعمة في التفاؤل، فشركة تؤسس حول وسيلة معالجة ناجحة ومحمية ببراءة اختراع لاستخلاص غاز هذه البلورات، ستحفر اسمك فوق مداخل المتاحف والمكتبات العامة والملاعب الرياضية وأي شيء تختار. ولن يكون ذلك سهلاً، فشركات النفط الكبرى كانت تعرف عن البلورات منذ السبعينيات لكنها لم تعلن حتى اليوم عن استراتيجية واعدة لاستخراجها. ولا تتضمن واجباتي مشكلة بلورات الغاز، لكن لو كنت مكلفاً بها لكنت بدأت بالاسترشاد بتلميحات الطبيعة، فبعض مناطق بلورات الغاز تحت سطح البحر تتدفق منها فقاعات الغاز تلقائياً. وتلك بداية مشجعة، حتى إن كان الغاز المتسرب غير ذي قيمة تجارية. وعلي أن أقوم بتشخيص الدافع وراء هذه التسربات الطبيعية، وأن أنظر في إمكانية تسخيرها.

إن مساهمة غاز المستنقعات وغاز أحواض الفحم وغاز مركز الأحواض والغاز من صخور السجّيل المتصدعة لا تزال بسيطة،

(*) هذه الحقيقة (حتى إذا كانت كميات البلورات أقل من المتوقع) كفيلة بتوفير الطاقة للعالم إلى حين نجاح البشر في تسخير الطاقات المتجددة والنظيفة. وعبقرية الإنسان ليست قاصرة عن إيجاد الحلول لتحرير الميثان منها.

لكنها مساهمات مرحب بها ضمن مصادر طاقتنا. وهي وإن كانت بسيطة على مستوى مقياس الغاز في أميركا الشمالية إلا أنها مصدر لربحية كبيرة للشركات الصغيرة أو للأفراد. أما ترسبات بلورات الغز المائية فهي تمثل إمكانيات كبيرة لكننا حتى زمننا هذا نفتقد إلى نجاحات هندسية لإنتاج الغاز منها.

الماء، الماء في كل مكان

تنتج كميات صغيرة من الماء في عديد من المناطق من أنواع المكامن الغازية. ويتراوح الماء من كونه عامل إزعاج إلى كونه مشكلة كبرى.

- يظهر بخار الماء في الغاز الطبيعي مثلما يظهر كرطوبة في الجو. ولدى مشغلي خطوط الأنابيب تحديدات على كمية بخار الماء الذي يقبلونه. وأحد الأسباب أن أي انخفاض في درجة الحرارة يساعد على اتحاد بخار الماء والغاز الطبيعي لتكوين بلورات الغاز المائية التي تسد خطوط الأنابيب. وتصبح هذه المشكلة على أشدها في الشتاء. من ناحية أخرى، يشتكي منتجو الغاز من أن مفتشي شركات خطوط الأنابيب لا يظهرون إلا في منتصف الصيف عندما لا يحتاج خط الأنابيب إلى كمية كبيرة من الغاز. وهناك أنظمة تجارية لنزع الماء تقوم بامتصاص الماء في السوائل المانعة للتجمد لكنها معقدة وغالية الثمن. وسيكون نظام بسيط ورخيص الثمن قدر على إزالة الماء من مليون قدم مكعب في اليوم أمراً مرحباً به.

- إن الماء السائل، وعلى الأغلب في هيئة محلول ملحي، يصل في أحيان عديدة إلى الآبار المنتجة. وإذا ما تجمع الماء في أنبوب البئر فسيصل الى ما يكفي لتوليد ضغط لإيقاف تدفق الغاز. وهناك ترتيبات مختلفة بما فيها أصابع صابونية وغير ذلك من الطرق

الذكية المستخدمة لإيصال الماء إلى السطح. وعندما تصل المحاليل الملحية إلى السطح تعتبر من المخلفات الخطرة. ويقوم مشغلو آبار الغاز غالباً بدفع بضعة دولارات لكل برميل من الماء المالح لكي تتم إزالته ونقله للتخلص منه في مواقع مرخصة للتخلص من النفايات. (وكنت منذ سنوات أطلب من طلابي التفكير بالحصول على مكامن غاز مستنفدة واستحصال إجازات لاستخدامها للتخلص من النفايات الخطرة). وآبار التخلص من الماء المالح شيء عادي في حقول النفط، أما في حقول الغاز فمن غير المبرر اقتصادياً حفر آبار مكرسة للتخلص من الماء، لأن كمية الماء المنتج قليلة.

ـ هناك مشكلة ماءٍ فريدة في حالة الغاز الطبيعي من أحواض الفحم، فالتصدعات في طبقات الفحم تكون في معظم الحالات مملوءة أصلاً بالماء. وإذا ما تم سحب ذلك الماء الأولي يبدأ غاز الميثان بالنزوح من طبقات الفحم خلال التصدعات وإلى الآبار المنتجة. وهناك في الأصل كمية كبيرة من الماء. ويستمر إنتاج الماء حتى عندما نستخلص كميات ذات مردود اقتصادي من الغاز. ويمكن أن يكون الماء إما ماءً عذباً أو ماء مالحاً. ويحتوي ماء الشرب، أكان للبشر أو للحيوانات، أقل من خمسمائة جزء بالمليون من الأملاح. ويمكن استخدام الماء الحاوي لألف جزء بالمليون من الأملاح لري المزروعات. وإذا ما زاد المحتوى الملحي للماء عن ذلك فستبرز الحاجة لنظام تصريف لذلك الماء. ويحوي حوض نهر باودر في ولاية وايومنغ على وجه الخصوص عروق فحم سميكة جداً، وهي ملائمة جداً لإنتاج ميثان الأحواض الفحمية. والماء القابل للاستخدام في ذلك المناخ شبه الجاف أمر مرحب به اقتصادياً. ويمكن أن تصبح المسطحات المملوءة بالأدغال مروجاً خضراء. لكن بعض الماء المنتج من أحواض الفحم في حوض باودر ريفر (Powder River

(Basin) مالح. ويمكن لأحواض التبخير في ذلك المناخ شبه الجاف أن تتخلص من الماء ببطء لكن هناك بعض الاعتراضات البيئية على أحواض الماء المالح المفتوحة في الهواء.

نقل الغاز

إن سوق النفط هي سوق عالمية، فالناقلات البحرية العملاقة تنقل النفط عبر نصف محيط الكرة الأرضية بكلفة لا تزيد عن دولارين للبرميل الواحد، إما الغاز الطبيعي، فهو بخلاف ذلك، ذو سوق تقتصر على القارة التي ينتج فيها، فخطوط أنابيب الغاز الطبيعي تنقل كميات هائلة من الغاز على اليابسة، لكن النقل عبر المحيطات محدود جداً. والطريقة العملية الوحيدة لنقل الغاز الطبيعي في الزمن هي بتبريده إلى درجة حرارة (259° ـ ف) أو تقريباً (162° ـ س) لكي يتحول إلى غاز طبيعي مسيّل، أو ما يدعى (LNG)، اختصاراً لعبارة (Liquified Natural Gas). ولم تكن بدايات الغاز الطبيعي المسيل طيبة في بداياتها في الولايات المتحدة(*)، فأي صناعة أو تكنولوجيا جديدة تصاب بضرر كبير من خلال حادثة غير مألوفة: فكارثة احتراق المنطاد هندنبرغ وضعت نهاية للسفر بمناطيد الهواء المصنعة من مواد صلبة، أما بالنسبة للغاز الطبيعي المسيل، فقد حدث تسرب منه إلى نظام تصريف مياه في مدينة كليفلاند سنة 1944، ما أدى إلى انفجار نظام التصريف. وقتل 128 شخصاً، كما

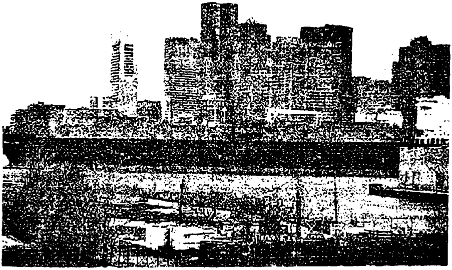
(*) لم يدرج المؤلف هنا طريقة مستحدثة نوعاً ما لنقل الغاز الطبيعي، وذلك من خلال تحويله إلى سوائل هيدروكاربونية خفيفة ومتوسطة (بنزين، وقود طائرات، وقود ديزل) أو ثقيلة (زيوت تزليق) ذات نوعيات ممتازة. وتعرف الطريقة باسم (GTL) وهي اختصار لعبارة Gas - to - Liquids. وهناك اليوم عشرت المصانع تبنى حول العالم لهذا الغرض، منها ثمانية في دولة قطر ومن المؤمل أن تحدث اختراقات علمية في طرق المعالجة بما يخفض كلفة هذه الطريقة ويعطيها تنافسية أكبر.

قتل انفجار حدث على جزيرة ستاتن سنة 1973 أثناء إجراء عمليات إصلاح لمنظومة غاز طبيعي مسيل، 37 من العاملين. ويدّعي بعض من قاموا بمراجعة القضية اليوم أن ضحايا جزيرة ستاتن كانوا نتيجة «حادثة بناء»، لكني أتذكر القراءة عنها في حينه واعتبرتها حادثة سببها الغاز الطبيعي المسيّل. وقتل انفجار حدث في كانون الثاني/ يناير 2004 في مصنع لتسييل الغاز في الجزائر ما بين عشرين وثلاثين شخصاً. وربما يكون سبب الحادث أيضاً مرجل توفير القوة لمصنع التسييل وليس من الغاز المسيل ذاته، لكن بعض الشكوك لازالت تحوم. وهناك اليوم أربعة موانئ أميركية تستلم الغاز الطبيعي المسيل، وهي إيفيريت في ماساشوسيتس، وكوف بوينت في ماريلاند، وإيليوت آيلاند في جورجيا، وليك شارلس في لويزيانا.

تشكل استيرادات الغاز المسيل نحو 5٪ من واردات الغاز الطبيعي في الولايات المتحدة. وتأتي غالبية المستوردات بخطوط أنابيب من كندا. ورغم أن كلاً من كندا والولايات المتحدة والمكسيك منتج رئيسي للغاز، إلا أن كندا تصدره إلى الولايات المتحدة، التي تصدره بدورها إلى المكسيك. ومن متطلبات اتفاقية (NAFTA) أن تستمر الأقطار الثلاثة في نموذجها التاريخي للتشارك في الغاز الطبيعي، لكن اتفاقية NAFTA على أي حال قد يجري لفها ورميها في سلة المهملات في حالة حدوث أزمة رئيسية في تجهيزات الغاز.

وكما ذكرنا سابقاً فإن معلومات وطريقة هابرت التي تعطي نتائج معقولة للنفط لا يمكن تطبيقها على الغاز الطبيعي. أما أحسن دراسة لتجهيزات الغاز فهي التحليل الذي أجراه ماثيو سيمونز (Matthew Simmons) الذي يرأس شركة مصرفية كبيرة مختصة بشؤون الطاقة في

هيوستن[7] (Huston)، فقد استحصل سيمونز على معلومات مفصلة عن الإنتاج من هيئة سكك الحديد في تكساس لآبار الغاز في ثلاث وخمسين مقاطعة في تكساس. وكان استنتاج سيمونز يقول إننا كنا نحافظ على مستويات ثابتة تقريباً لإنتاج الغاز الطبيعي في الولايات المتحدة من خلال حفر عدد متزايد من الآبار كل سنة. وقد توصل عدد من المراقبين الآخرين إلى نفس الاستنتاج الذي يدعونه باستراتيجية «الملكة الحمراء»[8] لأننا نركض بكل سرعتنا للبقاء حيث نحن.



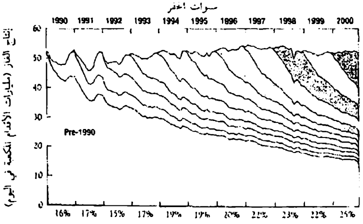
ناقلة للغاز الطبيعي المسيل (LNG) تترك ميناء بوسطن في كانون الاول/ يناير 2004 بعد تفريغ حمولتها في ميناء إيفريت للغاز (مايكل دواير (Michael Dwyer)، أسوشيتد برس ((Associated Press).

ويشير سيمونز أيضاً إلى أن آبار الغاز الأحدث لها أعمار إنتاجية أقصر فأقصر. وهذا ينتج جزئياً عن تقنيات الإنهاء الأحسن للآبار

(7) تتوفر محاضرات وأوراق سيمونز على: http://www.simmonscointl.com

(8) انظر: Martin Gardner, *The Annotated Alice* (New York: Bramhall House, 1960), p. 210.

وبخاصة معالجات التصديع المائي المحسَّنة. وإذا ما جرى خصم الأرباح المستقبلية اعتماداً على نسبة فائدة، كما وضحنا في بداية هذا الفصل، فسيكون لدى مشغل البئر محفز ليجعل البئر تستعيد رسملتها بأسرع وقت ممكن. وأقوم مراراً بسؤال العاملين في هذه الصناعة عمّا إذا كانت نسبة الفائدة المنخفضة السائدة اليوم ستسبب حفر الآبار على مسافات أكثر تباعداً، وأنها ستتمتع بمدى حياة أطول. وما أحصل عليه عادة هو نظرة جوفاء (لكن ليس من سيمونز)، بما معناه أنني لا أفهم المشكلة. ويتوقع كما بينا في الفصل الثاني أن تصبح الأسعار غير منتظمة ومرتبكة عندما يقارب الطلب سعة النظام. ويبين الشكل على الصفحة (80) بأن أسعار الغاز الطبيعي في الولايات المتحدة كانت مستقرة بصورة معقولة لغاية سنة 1985، لكنها خضعت لتأرجحات متزايدة منذ ذلك الحين. وكانت الانحرافات السعرية على أشدها خلال شتاء 2002 ـ 2003، حيث كان بالإمكان تضاعفها خلال عطلة نهاية أسبوع فقط.



تبدي آبار الغاز المحفورة مؤخراً في الولايات المتحدة نسب تناقص أسرع من الآبار القديمة. ويمكن أن يكون سبب هذا جزئياً الاستخدام الأعنف للتكسير المائي. لكن التفسير الكامل للتناقص الأسرع غير واضح (جيفري ل. وورد (Jeffrey L. Ward)، استناداً إلى معلومات زودتها بتروليوم إنفورمايشن كوربورايشن (Petroleum Information Corporation)، وقد أعد المخطط الأصلي من قبل (EOG Recources, Inc., copyright © 2000))

ويمكن لمستهلكي الغاز الرئيسي أن يثبتوا سعراً للغاز فيما إذا كان هناك منتج مستعد لتوقيع عقد طويل المدى. وبإمكان أي فرد شراء عقد في سوق الغاز الطبيعي. ولا يهتم أولئك منا الذين يستخدمون الغاز لتدفئة البيت أو لتشغيل فرن الطبخ بمعرفة سعر الغاز. كان الغاز الطبيعي قبل ثلاثين عاماً يعامل كخدمة عامة خاضعة للتنظيم السعري، لكن الحماسة السياسية الحالية للتخلص من المحدّدات (Deregulation) تترك العديد من المستهلكين الصغار معرّضين إلى التأرجحات السعرية الجامحة. بعد كارثتي كاليفورنيا وإينرون، أبدى الناس حنينهم إلى الأيام السابقة الطيبة، حين كانت الخدمات العامة تخضع للتحديد. ونصيحتي الوحيدة هي أن نكون حذرين. إن كمّاً كبيراً من الارتباك السعري سببه مقاربة الطلب السعة الإنتاجية المتوفرة. ولن تفيد إعادة تحديد السعر في إلغاء مشكلة الطلب ـ السعة المتوفرة.

وعلي أن أُقر بأن كتابي **ذروة هابرت** (*Hubbert's Peak*)، كان شديد التفاؤل حول تجهيزات الغاز الطبيعي، فقد حوَّل ازدياد الأسعار سنة 1970 الغاز الطبيعي من ناتج عَرَضي إلى مصدر ثمين. لقد توسَّع التنقيب إلى مناطق وراء النافذة النفطية، وهي مناطق تعتبر الآن ـ أو كانت يوماً ما ـ ساخنة بما فيه الكفاية لتحويل النفط الخام إلى غاز طبيعي. إن تطوير الإمكانيات النفطية في الولايات المتحدة إلى قابلياتها القصوى استغرق سبعين سنة. وكان خطئي في افتراض أن تطوير إمكانيات الغاز الطبيعي سيحتاج لفترة مماثلة من الزمن. لكن الذي حدث أن أفضل الأهداف للغاز الطبيعي تم حفره ما بين سنتي 1980 و2002. وما لدينا الآن هو المتروكات.

الفصل الخامس

دعنا نفكر بالفحم الحجري

الفحم الحجري هو أفضل أنواع الوقود وأسوأها. أفضلها لأنه أرخص جداً للوحدة الواحدة من الطاقة، وأسوأها لقائمة طويلة من الأسباب: الضباب الدخاني القاتل والأمطار الحمضية وثاني أوكسيد الكاربون في الجو والتلوث الزئبقي والمياه الحمضية المستنزفة من المناجم وخيار بين مناجم خطرة تحت الأرض ومناجم مفتوحة مشوهة للسطح الطبيعي للأرض. ويقال ـ في ما يصنف ضمن روح الفكاهة القائمة بين مجهزي الطاقة ـ إن مهندساً نووياً أنشأ مرة مذكرة سلامة مزيفة تدعي أن محطة قوة كهربائية تعمل بالفحم ستكون خطرة إلى درجة غير مقبولة.

ورغم سلبيات الفحم، نجد في الولايات المتحدة ستة الآف منجم فعال للفحم. وتعتبر احتياطيات الفحم العالمية كبيرة بما فيه الكفاية للاستمرار على نفس وتيرة الإنتاج الحالية لبضع مئات من السنين. وكان الوقود الذي حرك الثورة الصناعية هو الفحم. وأفاد الفحم في عملية التسخين وفي التحويل الكيميائي لخام الحديد إلى صلب. وكان اكتشاف مناجم فحم جديدة ذا أهمية كبرى في عملية التحول إلى الصناعة في إنجلترا. وكانت الأحواض الفحمية قد

تشكلت خلال فترات محددة في التاريخ الجيولوجي فقط، وكان العديد من الحقبات الجيولوجية التي نستخدمها اليوم قد حُدِّد، وأعطيت تلك الحقبات أسماءها في الأصل خلال عمليات البحث عن الفحم البريطاني[1]. وقد امتلكت الولايات المتحدة والاتحاد السوفياتي السابق، ولا تزالان تمتلكان، أكبر احتياطيات العالم من الفحم، وأصبحتا أكبر اقتصادين صناعيين، وكان أحد الأسباب الرئيسية في ذلك هو إمكانية الوصول السهل إلى كميات كبيرة من الفحم.

لقد كان الرمز الذي توج الثورة الصناعية هو الفرن النفاخ أو الفرن العالي (Blast Furnace)، وكان خام الحديد والفحم المعالج سابقاً وحجر الكلس يلقّم في قمة الفرن وينفخ الهواء المسخن سابقاً في قاعدة الفرن. ويسكب الحديد المنصهر والخبث الزجاجي من أسفل الفرن. وكان الفحم المستخدم يعالج مسبقاً في أفران كبيرة لإنتاج كتل محروقة جزئياً وتعرف باسم (الكوك Coke). أما المنتجات الثانوية الغازية والسائلة من أفران إنتاج الكوك فكانت «عصيدة السحرة»، لكن صناعات كاملة أنشئت لاستغلال هذه المنتجات، فالغازات كانت قابلة للاحتراق واستخدمت للإنارة أو للطبخ، أما الأمونيا، فقد حولت إلى سماد واستخدمت الهيدروكاربونات السائلة التي كانت تدعى بزيت الفحم، في مصابيح الكيروسين (واستمر جيل والدي يدعون الكيروسين النفطي بزيت الفحم لخمسين عاماً بعد أن أصبح النفط المصدر الرئيس للكيروسين). لقد كانت أكثر الابتكارات الصناعية إثارة مجموعة من

(1) انظر: Martin Rudwick, *The Great Devonian Controversy* (Chicago: University of Chicago Press, 1975), pp. 78-102.

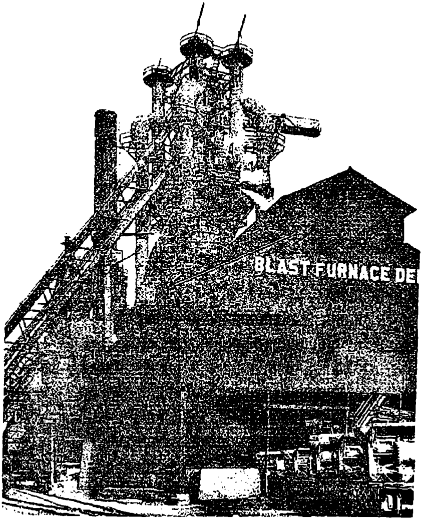
الأصباغ الاصطناعية التي استخدمت المكثفات اللزجة (القطران) الذي أنتجته أفران الكوك. وقد أعطتنا أصباغ الإينيلين هذه سلسلة من ألوان الأقمشه التي لم تكن متوفرة من المصادر الطبيعية سابقاً.

وما أن أنارت المنتجات العَرَضية لأفران الكوك الطريق لنا حتى إزدهرت صناعة المنتجات الكيميائية. وجرت معالجة الفحم بعدد من الأساليب لتوليد منتجات مفيدة، فحرق الفحم بوجود بخار الماء ولد مزيجاً من أول أوكسيد الكاربون وغاز الهيدروجين والذي يعرف بأسماء مختلفة، كـ «غاز المدينة»، أو «الغاز المنتج»، أو «غاز الماء»، أو «غاز الفحم»، أو «الغاز الصناعي»، والغاز الحاوي على أول أوكسيد الكاربون عالي السُّمية، لذا فإن هذه الغازات المشتقة من الفحم لا تستخدم الآن في المدن. إلا أن التفاعل على أي حال قد أصبح خطوة أولية في عمليات المعالجة الموجودة حالياً والممكنة مستقبلاً.

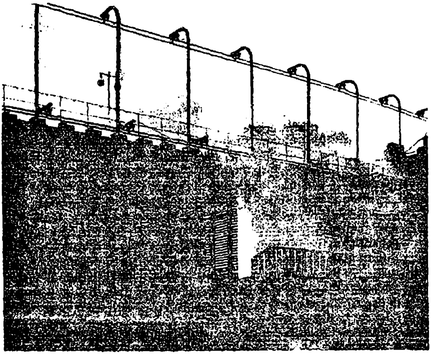
أما بالنسبة للاستخدامات البيتية، فقد تم استبدال الغازات المشتقة من الفحم بغاز الميثان من آبار الغاز الطبيعي. وهناك طريقة معالجة لتصنيع غاز الميثان من الفحم حيث يعرف المنتوج بـسم الغاز الطبيعي المخلّق (Synthetic Natural Gas) أو (SNG) للاختصار. إن تطوير (SNG) ليس ضمن أجندتنا الحالية، لكن ربما يظهر عندما يصبح الغاز الطبيعي نادراً.

إن مزيجاً من أول أوكسيد الكاربون والهيدروجين يمكن أن يستخدم من دون أي تحويرات إضافية كعامل تفاعل كيميائي، فأفران الحديد النفاخة قد استبدلت بطريقة تعرف بالاختزال المباشر لخامات الحديد. وطريقة العمل كالتالي: يحول المفاعل الأول الفحم والهواء وبخار الماء إلى أول أوكسيد الكاربون والهيدروجين، ويستخدم مفاعل ثانٍ هذه الغازات لاختزال خام الحديد إلى حديد. (ويجب أن

تدعى الطريقة بالاختزال غير المباشر، فالفرن النفاخ هو في الحقيقة طريقة مباشرة أكثر، لكننا سوف لا نعير ذلك اهتماماً). ويمكن استحصال معادن أخرى من خاماتها بالاختزال المباشر.



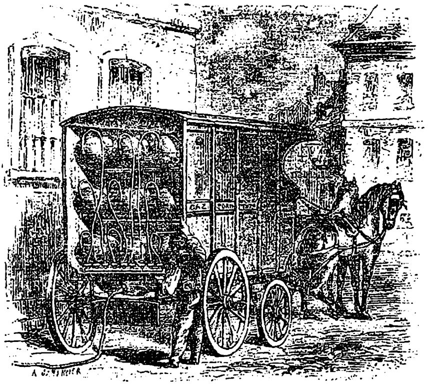
ينتج الفرن النفاخ (الفرن العالي) الحديد بتلقيم صخر الحديد وفحم الكوك (فحم حجري معالج) وحجر الكلس قرب القمة وبواسطة حقن تيار من الهواء سابق التسخين قرب القاعدة. ويتكون حوض من الحديد السائل عند القاعدة ويمكن دفقه خارج الفرن لإكمال معالجته. وهذا الفرن يقع قرب مدينة بتسبرغ. وربما كانت الصورة تعود، إلى ما قبل سنة 1960. ورغم أن غالبية الأفران النفاخة قد استبدلت بتكنولوجيات أحدث، إلا أن بعضها لايزال يعمل في عدد من المواقع حول العالم (Culver Pictures).



تكوّن بعض أنواع الفحم الحجري عند تسخينها نوعاً من التفحم المسامي الذي يعرف باسم (كوك)، وهو مادة أساسية تلقّم في الفرن النفاخ. ويجري في هذه الصورة تعبئة الكوك الساخن المتوهج من الفرن في عربة قطار (Culver Pictures).

وهناك طريقة ذات أهمية تاريخية تحول الغازات من تفاعلات الفحم إلى بنزين ذي نوعية ممتازة. ويستخدم تفاعل فيشر - تروبش (Fischer - Tropsch reaction) عاملاً حفازاً غنياً بالحديد لتحويل الغازات إلى هيدروكاربونات سائلة. ولم يكن يتوفر لألمانيا النازية خلال الحرب العالمية الثانية أي منفذ إلى النفط الخام، لذا لجأت الى الفحم، فقد أنتج تحويل الغاز المستحصل من الفحم رخيص النوعية من خلال تفاعل فيشر - تروبش بنزين طائرات ذا درجة اوكتان تبلغ 100 مثلما أنتج أيضا وقود الديزل. وقد استخدمت طريقة محسنة من ذات التفاعل في أفريقيا الجنوبية أثناء عصر الآبارتايد. ورغم أن الطريقة لها أسلاف سياسيون غير مرغوبين، لكننا عندما نصل إلى ذروة هابرت فقد يترتب علينا الالتفات إلى البنزين ووقود الديزل

المشتقين من الفحم لملء جزء من الهوة التي سيسببها انخفاض الإنتاج العالمي للنفط الخام.



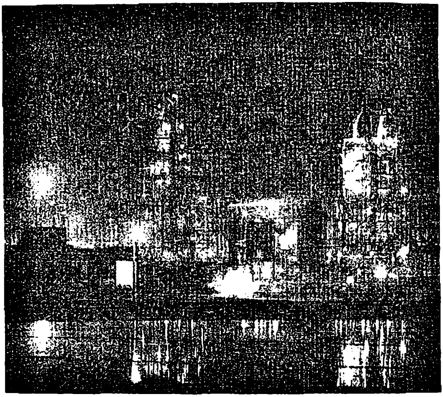
كان تفاعل الفحم مع البخار ومقدار محدود من الهواء يعطي «غاز الفحم»، وهو مزيج خطر من أول أوكسيد الكاربون والهيدروجين والميثان. وتبين هذه الصورة المحفورة غاز الفحم يوصل إلى البيوت في باريس سنة 1870 للاستخدام في الإنارة (Science Photo Library).

وأسرع طرق تحويل الفحم إلى غاز نمواً في الوقت الحالي هي الطريقة التي صممت لتعظيم إنتاج الهيدروجين. وهناك سوقان كبيران للهيدروجين الآن.

- تكرير النفط يستخدم الهيدروجين لتحسين الجزيئات الأكبر والأثقل في النفط الخام وتحويلها إلى جزيئات هيدروكاربونية أصغر من النوع الموجود في البنزين.

- يفاعل الهيدروجين مع النيتروجين الجوي باستخدام عامل

حفاز من النكيل لتصنيع الأمونيا التي تحول بعد ذلك إلى سماد وإلى منتجات أخرى حاوية على النيتروجين.



أنتجت أفريقيا الجنوبية أثناء فترة الفصل العنصري البنزين من الفحم. وتبين الصورة مصانع شركة ساسول التي بنيت سنة 1975. ورغم أن أفريقيا الجنوبية تمتلك الآن حق الوصول إلى النفط المستورد إلا أن هذا المصنع يحول الفحم إلى مواد لتغذية مصانع البتروكيميائيات .(Gerald Cubitt)

ـ كانت أرخص طرق استحصال الهيدروجين سابقاً هي كسر جزيئة الميثان من الغاز الطبيعي، لكن الطلب على الغاز الطبيعي في بعض الأسواق تجاوز قابلية الإنتاج. وكانت شركة تكساكو، وهي الآن جزء من شيفرون ـ تكساكو، قد حسنت الطريقة لتحويل الفحم إلى غاز لإنتاج الهيدروجين، وتم ترخيص أول مصنع من هذا النوع سنة 1954. وهناك في الصين كميات مبتذلة من الفحم وكمية متواضعة من الغاز الطبيعي وطلب هائل على السماد. وكانت تكساكو

قد باعت حتى سنة 2001 ثمانية مصانع لتحويل الفحم إلى غاز إلى الصين، وهناك كمية أخرى قيد الطلب. ويتفاعل الفحم في طريقة تكساكو مع الأوكسيجين النقي وبخار الماء في درجة حرارة عالية جداً، ثم تبرد الغازات الناتجة ويجري فصل الهيدروجين. والمنتوج العرضي هو ثاني أوكسيد الكاربون الذي يقوم الصينيون رغم الإحباط الذي يصيب المهتمين بالبيئة بإطلاقه إلى الجو.

وأكبر أسواق ثاني أوكسيد الكاربون حالياً هو في تعزيز إنتاج النفط من حقوله الحالية. وبيع ثاني أوكسيد الكاربون سيحسن اقتصاديات هذه المشاريع، أما الخيار الثاني من حيث الأفضلية فهو حقنه في مكامن طبيعته تحت الأرض بدل إطلاقه في الجو.

وتلوح في الأفق طريقة لإنتاج ثنائي ميثيل الأيثر من الفحم (والأيثر المستخدم في التخدير هو ثنائي أثيل الأيثر). والاستخدام الرئيسي لثنائي ميثيل الأيثر هو كدافع لرذاذ الشعر في العلب المعدنية. لكن هذه المادة هي وقود ديزل نموذجي تقريباً. ويبدأ إنتاج ثنائي ميثيل الأيثر من الفحم بنفس طريقة تكساكو لإنتاج الهيدروجين، لكن الهيدروجين وأول أوكسيد الكاربون يحولان إلى ثنائي ميثيل الأيثر. والكلفة الحالية لإنتاج وقود الديزل بهذه الطريقة تتراوح بين دولار إلى دولارين للغالون الواحد قبل إضافة أي ضرائب. وهناك مصنع ريادي سعته 14000 برميل في اليوم مخطط لإنشائه في نينكسيا في الصين[2].

ورغم الاستخدامات المفيدة المختلفة للفحم، إلا أن غالبيته تطحن وتستخدم كمصدر للحرارة. ويحرق نحو ثلثي الفحم المستخرج في الولايات المتحدة لتوليد البخار، الذي يدوّر بدوره

(2) انـظـر: Eric Larsen and Ren Tingjin, «Synthetic Fuel by Indirect Coal Liquefaction,» *Energy for Sustainable Development*, vol. 7 (2003), pp. 79-102.

التوربينات لتوليد الكهرباء. وتنظيف الفحم قبل حرقه لإزالة الشوائب الكبريتية والزئبقية مستحيل تقريباً، لأن الفحم مادة صلبة خاملة تقريباً، والوصول إلى غازات العادم في المدخنة أسهل كيميائياً، لكن غسل كمية كبيرة من الغاز للتقليل من التلوث بثاني أوكسيد الكاربون والكبريت والزئبق ليست بالمهمة الهينة.

ومن الأرخص أحياناً نقل فحم من وايومنغ بسبب قلة الكبريت فيه مقارنة بإزالة الكبريت من فحم جبال أبالاشيان. وكانت أولى مصانع تحويل الفحم إلى غاز باستخدام تصميم تكساكو قد استخدمت لتوليد الكهرباء بهدف تقليل التلوث الجوي. لقد كانت المحطة تشغل من قبل جنوب كاليفورنيا أديسون لخمس سنين، بدءاً بسنة 1984. كانت المحطة ناجحة هندسياً وفاشلة اقتصادياً، وبعد السنين الخمس بدأت المحطة مرحلة مهنية ثانية أقل بهاء، وهي حرق مخلفات نظام الصرف الصحي.

أصول الفحم

تحوِّل النباتات ذات الأوراق الخضراء خلال نموها ثاني أوكسيد الكاربون المتواجد في الجو إلى مركبات عضوية وإلى غاز الأوكسجين، وتقوم الباكتيريا بعد ذلك بأكسدة الأوراق الساقطة، ومن ثم النبات كله إلى ثاني أوكسيد الكاربون. وعندما تتعادل العمليتان لن يكون هناك أي اختزان للكاربون، وبذلك لن يكون هناك أي مساهمة لترسبات فحمية مستقبلية.

ويتجاوز نمو النبات في المستنقعات والمناطق المغمورة التحلل، فتراكم طبقة عضوية هي مصدر محتمل للفحم مستقبلاً. لكن مستنقعاً غنياً عضوياً هو مع ذلك محل غير اعتيادي كيميائياً، فكلما زاد سمك الطبقة العضوية السفلية لن تتمكن النباتات من الحصول على المغذيات المعدنية من التربة، ويصبح المستنقع أو

موضع المياه الضحل بيئة قليلة المغذيات، تستخلص النباتات فيه الدفق الضئيل من مغذيات النبات الذي يأتي ذائباً في مياه المطر، فقد وجد اختصاصي في الكيمياء الحيوية في جامعة مينيسوتا أن الماء الجاري من بعض مستنقعات مينيسوتا، البالغ عددها عشرة الآف، كان أنظف من الماء المقطر في بناية قسم الكيمياء. والحياة في المستنقعات صعبة، ويسهم في ذلك الغبار الذي تسفعه الرياح وكذلك الرماد البركاني. وتقوم بعض النباتات مثل نبات السلوى (Pitcher Plant) بالإطباق على الحشرات وهضمها لتعزيز مواردها الغذائية.

وعندما كتب ألفريد فيغينر (Alfred Wegener) أولى بحوثه عن الانجراف القاري سنة 1912 استخدم الأحواض الفحمية كأدلّة عن المناخ الاستوائي في الأزمنة الغابرة[3]. وقد ربط، مثلما يفكر معظمنا، النموَّ النباتي الغني مع الأدغال الاستوائية، لكن هذه الأكياس المملوءة بخُثّ الطحالب (peat moss) مستوردة من كندا وليس من البرازيل. يتراكم الخث في المستنقعات، وحتى على التلال قليلة الميل في إسكتلندا. ويمكن قطع كتل من الخث وتجفيفها وحرقها كوقود، لكن شهرة الخث الإسكتلندي سببها الويسكي الإسكتلندي: فالشعير المنبّت يتم تجفيفه على نار وقودها الخث وينتهي دخان الخث كنكهة يمكن تمييزها في الويسكي. وكمحارب قديم لخمس فصول من تدريس الجيولوجيا الحقلية في إسكتلندا خلال العطل الربيعية، أستطيع أن أصادق بدون تردد على كون مناخ إسكتلندا ليس استوائياً، وعلينا بالنسبة للمبتدئين أن نقر بإمكانية تكون بعض الفحم في المناخ البارد.

(3) انظر: Alfred Wegener, *The Origin of Continents and Oceans*, Translated from the 4th rev. German ed. by John Biram (New York: Dover, 1966).

إن قياسات ميل المجال المغناطيسي في الصخور الرسوبية القديمة يتيح لنا تحديد خطوط العرض القديمة. ومعظم كميات الفحم، كما يبدو من هذا التحديد، كانت قد تشكلت في عروض، أكان ذلك في الشمال أو الجنوب، تتجاوز خط العرض 40 وذلك بخلاف فرضية ألفرد فيغنر. وأحواض الفحم البالغ سمكها 100 قدم في مونتانا ووايومنغ في حوض نهر باودر كانت على وجه التخصيص قد ترسبت عندما وصلت أميركا الشمالية ولفترة قصيرة إلى 58 درجة شمالاً[4]. والفترة القصيرة في هذا المضمون تعني عشرة ملايين سنة.



الخث في إيرلندا سنة 1984، وهو مقطوع من السافية على اليسار ومكوم لكي ينشف. ولا يقتصر استخراج الخث بالضرورة على المستنقعات المسطّحة (فاريل غريهان (Farrell /Grehan) (Photo Researchers).

---

(4) انظر: Alan Smith [et al.], *Phanerozoic Paleocontinental World Maps* (Cambridge; New York: Cambridge University Press, 1981), pp. 24-26.

ولا تتحول الطبقات المترسبة في المستنقعات والمياه الراكدة بعد تكونها إلى فحم إلا بعدما تدفن. إن مصير معظم المواد السطحية هو التآكل على أي حال، فالتربة ومترسبات البحيرات لا تمثل إلا قليلاً في السجل الجيولوجي. والطريقة الفعالة لطمر المستنقعات الساحلية هي ارتفاع سريع لمستوى البحر الذي يقودنا إلى قصة بوليسية مشوقة، فعندما كان جدول الزمن الجيولوجي يطور في إنجلترا خلال القرن التاسع عشر، أعطى الجيولوجيون اسم (العصر الكاربوني) للفترة التي ترسبت فيها معظم أحواض الفحم البريطاني الرئيسية، وهي الفترة ما قبل 280 إلى 310 مليون سنة تقريباً. وبدا أيضاً أن أحواض الفحم في شرق الولايات المتحدة كانت بالعمر نفسه. وكان ذلك محيراً في تلك الفترة، لكنه ليس محيراً اليوم: فخلال الفترة الكاربونية، كانت أوروبا وأميركا الشمالية متصلتين عند الورك (وتدعى الأحواض الغنية بالفحم في الاستخدام الأميركي بالأحواض البنسلفانية).

وأظهر فحص دقيق للصخور من العصر الكاربوني خلال نهايات القرن التاسع عشر وبدايات القرن العشرين توالياً للطبقات تكرَّرُ عشرات المرات. وكلما كُرِّر التوالي ذاته كان هناك حوض فحمي. وبدل تسمية كل حوض أعطيت الأحواض ببساطة أرقاماً. وأكثر الأحواض إنتاجاً قرب بتسبرغ هو الحوض رقم 6. احتوى التوالي المتكرر على دليل رئيسي على مصدر الفحم: فالطبقات فوق الفحم مباشرة احتوت عادة على قواقع لمتحجرات بحرية. أما غياب المتحجرات البحرية تحت الفحم، فكان دليلاً على حدوث الترسب في مستوى أعلى من سطح البحر. آه! ربما كان الفحم ترسباً في مستنقع ساحلي دفن إما خلال ارتفاع مستوى البحر أو من خلال هبوط سطح اليابسة. لكن لماذا؟

والسر هو: يجب ألاّ يتسرب: فنحن العلميين نغطي على جهلنا بلصق تسمية طنانة على شيء لا نفهمه بمجموعنا، ففي سنوات الثلاثينيات تمت صياغة تسمية «سايكلوذم» (Cyclothem) للوحدات الجيولوجية في التوالي المتكرر للطبقات الفحمية. واحتوت الصخور الكاربونية على سايكلوذم، لكن هذه التسمية لم توضح الأمور، فعندما كنت طالباً سمعنا نقاشات ذكية حولها فيما لو مثلت السايكوذم أي شيء في الحقيقة، فأما أن سطح اليابسة ارتعش صعوداً ونزولاً، أو أن مستوى سطح البحر عانى من ذبذبات كبرى، أو ربما حدث كلا الشيئين.

وقد كان لي الحظ سنة 1961 لأسمع محاضرة ألقاها الجيولوجي الذي نجح أخيراً في حل المسألة، فقد تساءل هارولد وانليس (Harold Wanless) من جامعة إيلينوي عن إمكانية تأثير التغيرات في مستوى سطح البحر المتعلقة بتعاظم وتضاؤل العصور الجليدية القارية، على توليد السايكلوذم، لقد عرف أن حقباً جليدية رئيسية خلال السنين المليون المنصرمة قد رفعت وخفضت مستوى سطح البحر باستمرار، وفكّر في إمكانية حدوث شيء مشابه خلال العصر الكاربوني قبل 300 مليون سنة، فالقارات الجنوبية ـ أفريقيا وأميركا الجنوبية وأستراليا والقطبية الجنوبية والهند التي كانت تشكل قارة كوندوانا الكبرى ـ تمتلك أدلة على انجماد واسع ومتكرر. لكن المترسبات الجليدية في كوندوانا كانت من العصر البرمي (Permian) وليست من العصر الكاربوني. والعصر البرمي هو العصر الذي يلي العصر الكاربوني مباشرة، إنما علينا أن نلتزم الحذر، فهذه العصور يستمر كل منها عشرين أو ثلاثين مليون سنة. لذا، فإن المواد النباتية التي ترسبت في مستنقعات العصر الكاربوني لا يمكن تبريرها بفترات جليدية حدثت بعد عشرين مليون سنة.

رتّب وانليس سفرة إلى أستراليا، حيث يظهر تطور توالي الترسبات الجليدية في نصف الكرة الجنوبي. ورغم إن الانجماد في نصف الكرة الجنوبي ينسب إلى العصر البرمي، إلا أن الجيولوجيين الأستراليين بينوا أن هذا الاستنساب موضع شك، فقد كان هناك متحجرات من أوائل العصر الكاربوني في الطبقات تحت الحصى الذي شكله الجليد، لكن لم يكن هناك أي متحجرات ملحوظة ضمن الترسبات الجليدية ذاتها. لذا، فإن جزءاً من تجمد نصف الكرة الجنوبي أو جميعه يمكن أن يكون قد حدث خلال نهايات العصر الكاربوني.

إن توالي طبقات الانجماد الكاربوني في أستراليا يحتوي على خمسين حوضاً من الفتات الجليدي (ومعظمه بهيئة حصى) تفصلها طبقات من مترسبات ذات حجم حبيبي أدق. ويفترض أن كل طبقة من طبقات الحصى الخمسين كانت نتيجة تقدم وانحسار للمناطق الجليدية القارية. إن بناء صفيحة جليدية قارية رئيسية له مترتبات كونية، فهناك ما يكفي من الماء المخزون في الصفيحة الجليدية لخفض مستوى سطح البحر. (وكمثال، إذا ما ذابت الصفائح الجليدية التي تغطي غرينلاند والقارة القطبية الجنوبية اليوم، فإن مستوى سطح البحر سيرتفع بنحو مائتي قدم). وكانت المستنقعات الساحلية في أوروبا وأميركا الشمالية تدفن بالارتفاع الكوني لمستوى سطح البحر كل مرة انحسرت فيها الصفائح الجليدية في نصف الكرة الجنوبي.

وكان عدد الدورات الجليدية آخر الأدلة الذي وضع نهاية لقصة السايكلوذم البوليسية: فقد كان هناك خمسون طبقة من الحصى الجليدي في أستراليا، وواحد وخمسون سايكلوذم في أميركا الشمالية. والعدّ ليس بتلك الدقة، إذ إن هناك بعض الدورات الجزئية في السجل. لكن التوافق بين العمر وعدد الدورات الجليدية أنهى

على أي حال وبصورة جوهرية ذلك الجدل الطويل:

إن أحواض الفحم الرئيسية في أوروبا وشرق الولايات المتحدة هي مستنقعات ساحلية دفنت بتغيرات سطح البحر التي سببتها العصور الجليدية في نصف الكرة الجنوبي.

ومنذ سمعتُ وانليس سنة 1961 قمت بمتابعة هواية صغيرة سخيفة، فالتغيرات في مستوى سطح البحر التي شخّصها وانليس يجب أن تكون على مستوى الكوكب، فأي أحواض من نهاية العصر الكاربوني، في ما إذا كانت تحتوي على الفحم أو لا، ستكون قد تأثرت بتذبذبات مستوى سطح البحر. لذا فكلما أرى سفح جبل يبدو كأن فيه حزوزاً، وحينما يكون عرض أو سمك كل شريط يبلغ نحو مائة أو مائتي قدم، أبدأ بالتساؤل في ما إذا كان من نهاية العصر الكاربوني، فالصخور الرسوبية من نهايات العصر الكاربوني تبدو واضحة حتى على بُعد أميال ذات حزوز أكثر من الصخور من أي عصر آخر.

وبعد سنة 1983 تبين لي أن تلك الهواية لم تكن بتلك السخافة، فقد نشر بوب بيرنر (Bob Berner) وتوني لاساغا (Tony Lasaga) وبوب غاريلز (Bob Garrels) نموذجاً يعرف باسم (BLaG) لمناخ الأرض وكيمياء المحيطات خلال العصور[5]. وكانت إحدى النتائج غير المتوقعة من نموذجهم أن الاوكسيجين الجوي تضاعف خلال العصر الكاربوني. والمعتاد أن تقوم الباكتيريا التي تؤكسد المادة

---

(5) انظر: R. A. Berner, A. C. Lasaga and R. M. Garrels, «The Carbonate - Silicate Geochemical Cycle and its Effect on Atmospheric Carbon Dioxide Over the Past 100 Million Years,» *American Journal of Science*, vol. 283 (1983), pp. 641-683.

العضوية بعكس ما قامت به النباتات في عملية التركيب الضوئي، وبذلك لن يحدث أي تأثير على الأوكسجين أو ثاني أوكسيد الكاربون في الجو. وعلى أي حال إذا نجت النباتات الغنية بالكاربون من التحلل بواسطة الباكتيريا ودفنت لتكون الفحم، فإن الأوكسجين الناتج عن عملية التركيب الضوئي سيُترك في الجو. والطريق المتاح للأوكسجين ليهرب من الجو هو خلال التغيير الكيمائي لأنواع التربة (الخضراء أو السوداء المدعوة الحديدوز عادة) للمعادن المختزلة الغنية بالحديد، لينتج عنه ترسبات تحتوي الحديد المؤكسد (ويكون عادة من نوع الحديديك الأحمر). وتكون الصخور الرسوبية من العصرين اللذين تليا العصر الكاربوني، وهما العصر البرمي والعصر الثلاثي (Triassic)، عادة حمراء، كما وضح ذلك جون ماكفي[6] .(John McPhee)

ورغم أن الارتباط بين الفحم الكاربوني والأحواض الحمراء من العصرين البرمي والثلاثي تبينت في البدء مثل واحدة من قصص «Just So» روديارد كيبلنغ (Rudyard Kipling)، إلا أن بوب بيرنر حاول بطريقة جادة إخراج تضاعف الأوكسجين من نموذج BLaG. وأعلن بيرنر أن محاولته فشلت. وحسب اعتقاده، فإن ضغطاً للأوكسجين يعادل ضعف الضغط الذي يسلطه اليوم هو أحد الخواص القوية للنموذج[7]. ويشكل هذا الفشل منظوراً داخلياً مشوقاً في طريقة عمل العلوم، فمعظم العلميين يحتفظون بقائمة ذهنية غير رسمية للأفكار مرتبة من أكثرها احتمالية (فلا يتوقع نقضه عما

(6) انـظـر: John McPhee, *Annals of the Former World* (New York: Farrar, Straus & Giroux, 1998), pp. 29-30.

(7) انظـر: Robert Berner, «Modeling Atmoshperic O2 Over Phanerozoic Time,» *Geochimica et Cosmochimica Acta*, vol. 65 (2001), pp. 685-694.

قريب) إلى أفكار قد يمكن أن تكون صحيحة لكنها معرضة لخطر النقض.

وعندما أعلم أن شخصاً علمياً متمكناً قضى سنتين في محاولة جادة إنما غير ناجحة ليبرهن على خطأ الفكرة، فسأرفع الفكرة بضع درجات في قائمة الاحتمالات الفكرية في ذهني. وأنا أتبنى الآن وجهة النظر القائلة إن ترسيب الأحواض الفحمية في العصر الكاربوني كان السبب في الترسبات الحمراء في عصور لاحقة. ورغم الأهمية الاقتصادية المبكرة لفحم العصر الكاربوني المتأخر، إلا أن الترسبات الفحمية من عصور أخرى موجودة، فأحواض الفحم السميكة في وايومنغ ومونتانا أقل عمراً بكثير، وهناك في مواقع أخرى أحواض فحم أقدم جداً. وكان الأستاذ أ. ف. بدنغتون عندما كنت طالب دراسات عليا في برنستون قد ذكر أنه رأى فحماً من العصر ماقبل الكامبري (Precambrian) في الاتحاد السوفياتي، يعود إلى تاريخ سبق تكوُّن المتحجرات ذات الأصداف الصلبة. وكان معظمنا سنة 1957 يفكر أنه لم يكن هناك شيء حي تقريباً في العصر قبل الكامبري. فتطايرت الأسئلة من الجمهور موقفة محاضرة بدنغتون. واختفى بدنغتون في مكتبه ومن ثم عاد ومعه قطعة من الفحم الأسود البراق، وكان نصف ما فيها من فحم تقريباً قد تحول إلى غرافيت بلوري. وكان الفحم ماقبل الكامبري نتيجة ذلك بالكاد يشتعل لكن الروس كانوا على أي حال يستخرجونه ليعلمونا درساً سنتذكره: فالأوقات الصعبة تشجع أساليب استخراج تتسم بالتهور.

هناك شيئان يساهمان في تنوع ترسبات الفحم: نوع النبات الذي كان في البدء، وحرارة الدفن التي «تطبخ» الخث اللين لتجعله فحماً صلباً. ويستخدم علماء صخور الفحم مجموعة مفردات هائلة لا أفهمها لوصف هذا التنوع. وهذا نوع من العدالة الشاعرية: فنحن الجيولوجيين غير المختصين بالفحم نستخدم مفردات متخصصة تملأ معجماً من 740 صفحة.

أما الجزء المتأخر من العصور الجيولوجية، وهو الزمن الذي أصبحت لدينا فيه متحجرات ذات أصداف صلبة، فيقسم إلى الحُقب القديمة أو الباليوزوية (Paleozoic) والوسطية أو الميزوزوية (Mesozoic) والحديثة أو السينوزوية (Cenozoic). ويبقى القلة من العلماء الذين يدرسون النباتات القديمة يذكروننا بأن زو (Zo) في هذه الكلمات ذات صلة بالحيوانات. وإذا ما أردت دراسة النباتات المتحجرة، فهناك الحقب النباتية القديمة أو الباليوفايتية (Paleophytic) والنباتية الوسطى أو الميزوفايتية (Mesophytic) والنباتية الحديثة أو السينوفايتية (Cenophytic) ولها حدود زمنية تختلف عن الحقب الحيوانية[8]. وكانت النباتات ـ ومعظمها تتكاثر بواسطة السبورات (الأبواغ) ـ قد استعمرت اليابسة خلال منتصف الحقبة الحيوانية القديمة: وكانت تلك هي الحقبة النباتية القديمة، وتمتد الحقبة النباتية الوسطى من منتصف العصر البرمي إلى منتصف العصر الكاربوني، وسادت فيها السرخسيات (ferns) وعاريات البذور (Cycads) والصنوبريات (Conifers). أما النباتات كاسية ـ أو مغطاة ـ البذور (Anginosperms)، وهي النباتات المزهرة الحالية، فلم يكمل تطورها إلا خلال العصر الطباشيري، ولا تزال نباتات الحقبة الوسطية تسود في يومنا هذا.

وتحتوي النباتات، رغم تغيرها عبر الزمن، على كمٍّ من الأجزاء المختلفة التي يمكن أن تنتهي في مواقع مختلفة في المستنقع، فالأخشاب والأوراق والطحالب والحشائش والريزومات تحت السطحية والأشنات، وحتى السبورات، يمكن أن تعطي أنواعاً

(8) انظر: Andrew Knoll, «Patterns of Extinction in the Fossil Record of Vascular Species,» in: Matthew H. Nitecki, ed., *Extinctions* (Chicago: University of Chicago Press, 1984), pp. 23-68.

مختلفة من الفحم، فالفحم سريع الاتقاد (Cannel Coal) يتألف بصورة رئيسية من السبورات وحبوب اللقاح، وهو الفحم المفضل للاستخدام في الموقد البيتي. ولا أزال احتفظ بالبعض منه في مرآب البيت حيث يشكل جزءاً من التهيؤ لحالات الطوارئ.

وهناك نوع معين من الفحم يجب أن أذكره: الكهرمان الأسود (Jet). وهذا نوع من الفحم الصلب الأملس ذو اللون الأسود الغامق يتواجد في عدسات صغيرة ضمن الصخور الرسوبية قرب الحدود الإنجليزية ـ الإسكتلندية. وكان هذا الفحم، وبخاصة في عهد الملكة فيكتوريا، يقطع بهيئة جواهر وتتزين به النساء الحزينات اللواتي كنّ في طور الحداد على موت أزواجهن. وقد لبست الملكة فكتوريا ثياب الحزن لسنين طويلة بعد موت الأمير ألبرت: وادعى بعض الساخرين أن منظرها في ثياب الحزن كان ملائماً. ولم تعد المجوهرات المصنوعة من الكهرمان الأسود جزءاً من الزي السائد آنذاك، وكنت قد قمت بالبحث عن هكذا مجوهرات في السوق الضخمة للسلع المستعملة في مدينة كلاسكو من غير أن أنجح. وبعض هذه المجوهرات معروض على شبكة الإنترنت لكن عليك توخي الحذر، فهذه التسمية (Jet) استخدمت لتعني اللون (Jet Black)، لذا فقد لا يكون المعروض بالضرورة من الكهرمان الأسود.

وإضافة إلى الاختلاف في مادة المصدر، فإن أحواض الفحم تتباين إلى درجة كبيرة، من حيث تاريخ دفنها، فبعد أن تدفن أحواض الفحم وبخاصة بسبب درجة حرارة الدفن القصوى، تنتقل الأحواض خلال أنواع فحم الليكنايت (Lignite) ومادون البيتيومينية (Sub-bituminous) والبيتيومينية، ومن ثم نوع الأنثراسايت (Anthracite). ويصبح الفحم عبر هذا المسار أغنى بالكاربون بصورة متزايدة. وفحم الأنثراسايت يحوي أكثر من 90٪ من الكاربون. وما

نستخدمه تجارياً هو على الغالب من النوع البيتيوميني. وكان دايفد وايت (David White) قد أشار سنة 1915 إلى أن الفحم والنفط يحتاجان إلى نفس حرارة الدفن(9). ودرجة الحرارة في منتصف النافذة النفطية توازي درجة الحرارة في منتصف طبقة الفحم البيتيوميني. أما فحم الأنثراسايت فيتكون دون مستوى النافذة النفطية، حيث يكون الهيدروكاربون الوحيد هو غاز الميثان النقي.

وأحد المكوّنات المزعجة في الفحم هو الكبريت. يتواجد الكبريت في الفحم بهيئتين:

الأولى كمركبات عضوية والأخرى كبلورات دقيقة للمادة غير العضوية، وهي البايرايت المعدني FeS_2. ويمكن في حالة النفط الخام السائل وفي الغاز الطبيعي إزالة الكبريت قبل تسويق المنتوج. أما في الفحم الصلب، فلا توجد مثل هذه الإمكانية. وأحد دوافع تعدين الفحم في وايومنغ هو المحتوى الكبريتي الواطئ مقارنة بأحواض الفحم في شرق الولايات المتحدة.

وكانت وسائل حرق الفحم في الأصل تدع الكبريت يتسامى في المدخنة. وكنت عندما انتقلت إلى برنستون سنة 1967 وفي أوقات عديدة أشمّ (أو أذوق) ثاني أوكسيد الكبريت من الفحم المحروق في ترينتون.

ويتأكسد ثاني أوكسيد الكبريت في النهاية خلال الهواء بدرجة أكبر ليتحول إلى حامض كبريتيك ويصبح مساهماً رئيسياً في المطر الحامضي. وقد تعجبت حقاً عندما نظرت في ما كان كلارك (Clarke)

---

(9) انظر: David White, «Some Relations in Origin Between Coal and Petroleum,» *Journal of Washington Academy of Sciences*, vol. 5 (1915), pp. 189-212.

قد قدمه سنة 1924 تحت تسمية Data on Geochemistry[10]، فالأنهار الكبيرة في نصف الكرة الشمالي كان فيها ما توقعته. البايكاربونات أولاً والكبريتات ثانياً والكلوريد في الدرجة الثالثة. لكن المدهش أن العديد من أنهار نصف الكرة الجنوبي لم تحتوِ على أي كبريتات تقريباً. ومعظم تلك الكبريتات في نصف الكرة الشمالي تقريباً من أصول صناعية حتى قبيل سنة 1924. وقد ساعد التحول خلال السنين العشرين المنصرمة على وجه التخصيص في معالجة جزء من المشكلة، فأنا لا أشم (أو أذوق) روائح تربنتون منذ مدة.

وتثير البايرايت مشكلة أخرى: النزف الحامضي من الآبار، إذ لا يجري نقل كل البايرايت مع الفحم، فبعض الفحم غير التجاري وبعض الحجر الطيني معه يتركان تحت الأرض أو يكومان في أكوام على السطح. ويتأثر البايرايت بصورة تدريجية بمساعدة الباكتيريا بعوامل المناخ ويحوله الأوكسجين الجوي إلى حامض كبريتيك مخفف. ويمكن للجداول الملوثة بالمياه الحامضية المستنزفة من المناجم أن تصبح حامضية إلى درجة تقتل السمك فيها. وقد وجد روبرت كلاينمان (Robert Kleinmann) عندما كان طالب دراسات عليا لدينا في برنستون أن الباكتيريا المقاومة للحوامض تقتل بسهولة بمقادير صغيرة من مساحيق التنظيف العادية[11]. وإحدى المعالجات المفيدة إلى حد ما هي أن يذهب شخص بعد كل مطر وينثر مسحوق التنظيف على أكوام النفايات. لكن معالجة ما هو تحت الأرض ليست

---

(10) انظر: F. W. Clarke, «The Data of Geochemistry,» *U. S. Geological Survey Bulletin*, vol. 770 (1924), pp. 95-96.

(11) انظر: Robert Kleinmann, «The Biogeochemistry of Acid Mine Drainage and a Method to Control Acid Formation,» (Ph. D. Thesis, Princeton University, 1979), pp. 1-22.

بهذه السهولة ويعدن الفحم عادة في مناجم تحت الأرض أو من خلال الحفر المكشوفة. وهناك عدد من الطرق لقتل الشخص في منجم للفحم تحت الأرض، وسأوفر عنك التفاصيل المزعجة. ولم يتيسر لي النزول إلى منجم فحم تحت الأرض إلا مرة واحدة، وكان ذلك كافياً وشكراً لك. كنت آنذاك في سفرة علمية طلابية من مدرسة كولورادو للتعدين، وكان اسم المنجم لَدلو (Ludlow) ويقع جنوب ولاية كولورادو. لاحظت على السطح إن كل عمال التعدين بدوا قصار القامة ومن أصول لاتينية. وما أن نزلت إلى الأسفل حتى تبين لي أن الأصل اللاتيني ليس بتلك الأهمية، لكن القامة القصيرة هي المطلوبة. وكان المجال حيث تم استخلاص عرق الفحم واسعاً بما فيه الكفاية لأقف منتصب القامة (وطولي هو 5 أقدام و11 إنشاً، أي نحو 180 سنتمتراً) لكن الأخشاب السائدة ملئت نحو ست إنشات من هذا المجال. وكنت بين فترة وأخرى أنسى نفسي وأضرب رأسي بالخشب. وأصبح ذلك أمراً مزمناً حتى مع قبعة سلامة صلبة. وأتعس ما في الأمر: أنك بعد أن تترك المنجم وتتمخط، فستلاحظ بقعة سوداء كبيرة من تراب الفحم على منديلك. وبسبب كثرة المخاطر، ليس هناك من طريقة لجعل المنجم محلاً آمناً فعلاً للعمل. وأفضل الطرق فعالية هو الإقلال من عدد العمال تحت الأرض ولا تحوي بعض المناجم الحديثة إلا نحو اثني عشر عاملاً.

لقد مرت الحافلة التي كانت تنقلنا في سفرتنا الحقلية عبر النصب التذكاري لمذبحة لَدلو، وكأن نزولنا إلى المنجم لم يكن كافياً، ففي سنة 1914 قام الحرس الوطني لولاية كولورادو وحراس مأجورين بحرق مخيم لعمال المنجم المضربين وإطلاق النار عليهم. وكانت النتيجة قتل عشرين شخصاً، أحد عشر منهم أطفال. وادعى مالكو المنجم أن مصدر النار كان مدفأة قلبت. أما أغنية

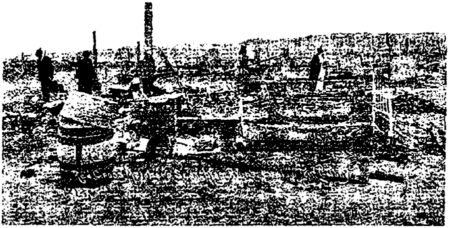
وودي غثري (*Woody Guthrie's*) فتروي قصة مختلفة. وفي محاولة بسيطة لعمل شيء أفضل، كنت أقف مع طلاب السفرة الحقلية الجيولوجية من جامعة برنستون طوال خمسة عشر عاماً أمام مانزانار (Manzannar)، وهو مخيم الاحتجاز الوحيد للأميركان من أصول يابانية الذي جرت فيه التظاهرات، مبيّناً لطلابي أن احتجاز اليابانيين سنة 1942 كان نقطة سيئة في التاريخ الأميركي.

أما المناجم المفتوحة فسجل سلامتها أفضل بكثير، لكنها تسبب أيضاً اضطراباً كبيراً على سطح الأرض. وهذه المناجم اقتصادية حتى عندما تتم إزالة ما سمكه قدم من الصخر لكل إنش من الفحم. وهناك وجهتا نظر حول إعادة استصلاح الأرض:

ـ تقول الحكومة: يجب إعادة تسوية السطح ليتماشى مع سطح الأرض الطبيعي الأصلي، كما يجب إعادة تشجيره بحيث تقارَن حالته النباتية بالغطاء النباتي الأصلي.

ـ يقول والت ذيرني: سنملأ الحفرة لتصبح بحيرة ونضع ملعب غولف هناك وفنادق غالية الثمن فيما بينها...

وكلا القولين ليس بالضرورة صحيحاً، لكن مع الازدياد الشديد لحاجتنا للطاقة قد نصبح أكثر إبداعية حول «إعادة تشكيل» الأرض بدلاً من «استصلاحها» المحض.



أعضاء من الصليب الأحمر يبحثون في أنقاض مخيم عمال المناجم المضربين بعد مذبحة لدلو (Ludlow) (الحقوق محفوظة، سنة 1995 ـ 2004 مكتبة دنفر العامة (Denver Public Library)، مجموعة تاريخ الغرب (Western History Collection)، جمعية كولورادو التاريخية (Colorado Historical Society) ومتحف فنون دنفر (Denver Art Museum)).

يرسل الفحم إلى السوق بطرق متعددة. فالنقل المائي بالزوارق النهرية أو بالبواخر عبر البحار هو أرخص الطرق، والنقل بالسكك الحديدية أغلى من ذلك بقليل، أما النقل بقطارات متخصصة مؤلفة من عربات لنقل الفحم مع استخدام التحميل والتفريغ الأوتوماتيكي، فلا يفوق بكلفته النقل المائي إلا بمقدار زهيد. ويمكن الحصول على النقل المائي أو بالقطارات بكلفة تبلغ سنت إلى سنتين للطن للميل الواحد. ويمكن نقل الفحم المطحون كمعلق في الماء في أنابيب مجهزة خصيصاً لهذا الغرض، رغم أن الكلفة الأولية عالية. ثم هناك الفحم خلال الأسلاك، فإذا كان الاستخدام النهائي للفحم هو لتوليد الكهرباء فلماذا لا نضع مولدت الكهرباء عند مدخل المنجم وننقل الكهرباء على خطوط نقل القوة المعلقة؟ وبعض المنشآت الكبرى في غرب الولايات المتحدة هي من هذا النوع. وهذا ما يكشف النقاب عن انقسام فلسفي عميق: فبعض منشآت الفحم خلال الأسلاك تولد

تلوثاً جوياً في بيئات كانت فيما سبق في حالتها الأصلية الرائقة. وتقول إحدى وجهات النظر إننا لا نمتلك إلا القليل من الأماكن التي لم يصبها التخريب، وإن علينا حمايتها. ويقول الرأي الثاني إن مستوى بسيطاً من التلوث في جميع المحلات خير من تركيز كافة مصادر تلوث الهواء في حوض لوس أنجلس. ولا أمتلك إجابة لهذه المشكلة، لكن النقاش ستزداد حدته عندما نبدأ بالانزلاق هبوطاً من ذروة هابرت.

والفحم في الخلاصة رخيص، كما هو متعدد الاستخدامات، وتمتلك الاقتصاديات الصناعية مصادر واسعة منه. وقد تكون خطة العمل الممكنة لمواجهة شحة النفط الوشيكة كالتالي:

1 ـ تحويل توليد الطاقة الكهربائية من الغاز الطبيعي إلى الفحم.

2 ـ استخدام الغاز الطبيعي كمصدر طاقة للسيارات والشاحنات.

3 ـ ادخار ما تبقى من النفط لاستخدامه في الطائرات.

لكن المشاكل البيئية الناشئة عن الاستخدام المتزايد للفحم ليست سهلة الحل على أي حالة. وتعود الجهود البحثية لحل مشاكل الكبريت وثاني أوكسيد الكاربون وبقية المشاكل البيئية إلى ما قبل عقدين. ولا نستطيع الادعاء أن مشاكل الفحم سيجري توفير الحلول لها خلال سنة أو سنتين بواسطة برنامج بحوث انفجاري.

واستغلال الفحم ليس بالمشكلة التي نستطيع تجاهلها. إن تخيل أسطول من السيارات غير المُلَوِّثة العاملة بخلايا الوقود بعد عشرين سنة من الآن لن يعوض تناقص إنتاج النفط خلال هذا العقد. وما أكره التصريح به، هو أننا سنضطر ـ كما يبدو ـ إلى اللجوء للاختيار بين مستوى أعلى من التلوث الناجم عن استخدام الفحم أو الاستغناء عن جزء لا بأس به من مستويات تجهيز الطاقة الحالية.

الفصل السادس

الرمال القيرية والنفط الثقيل

القار والزفت والقطران والإسفلت هي مسميات تعود بأصولها إلى فجر الحضارات (الأسماء الأربعة تعني تقريباً نفس الشيء)، فسلة موسى الصغيرة وسفينة نوح الواسعة كانتا تقاومان الماء بواسطة القار، وكانت المومياءات المصرية تحفظ بواسطة القطران. وكلمة «مومياء» (mummy) أصلها في الحقيقة كلمة فارسية تعني القار. ومعظم هذه المواد أصلها من النفط وتجرى عليها بعد ذلك معالجات طبيعية واصطناعية. وهناك بعض المنتجات غير النفطية تدعى بذات الأسماء: كالقطران الفحمي والزفت الصنوبري.

وتشمل المصادر الطبيعية لهذه المواد أحواض وبحيرات القار، مثل حفر لا بريا (La Brea) في لوس أنجلس، وبحيرة القار في ترينيداد، وحوض الإسفلت فوق حقل برقان النفطي في الكويت. ويمكن الحصول على القار أيضاً ممزوجاً بالمترسبات، كالرمل أو الحجر الرملي عادة. زرت إحدى مقالع الرمل - الإسفلت في ولاية يوتا، الذي كان يستخدم بين الفينة والأخرى من قبل دائرة الطرق المحلية. ويتألف سطح الطرق التقليدية السوداء ذات المسلكين في الغرب من مزيج من الرمل والإسفلت، وهو عادة من المواد المتبقية

من تكرير النفط. وكانت المكونات في حالة مقلع يوتا ممزوجة مسبقاً وجاهزة للاستخراج.

وتغطّي المنتجات الطبيعية طيفاً كاملاً ابتداء من النفط السائل الذي يستخرج من الحقول النفطية إلى النفط الكثيف الذي لا يزال يتدفق، وإلى النفط الأكثف من أن يتدفق، إلى الهيدروكاربونات الصلبة. وكان إنتاج النفط الكثيف «الثقيل» قد بدأ قبيل سنة 1900 في كاليفورنيا، فالنفط من حقول ميدواي صن سيت (Midway Sunset) وكيرن ريفر (Kern River) يحتاج إلى تسخين مسبّق لاستخلاصه. وكانت قد جُربت عدة طرق لهذا الغرض، وكان «الإغراق بالنار» (Fire Flood) قد استثير بطريقة غير متعمدة من خلال حقن الهواء في بعض الآبار. وأولعت النار تلقائياً داخل المكمن بنفس الطريقة التي تحترق فيها النار بالخرق المشبعة بالمواد النفطية. لكن الكبريت الموجود في النفط لسوء الحظ تحول من خلال التأكسد والحرارة والماء إلى حامض كبريتيك أكل بدوره أنابيب الصلب المبطنة للبئر. لذا فإن طريقتين أقل شدة حلتا محل الإغراق بالنار لتسودا في عملية إنتاج النفط الثقيل في كاليفورنيا.

- الحقن المتقطع للبخار الذي يعرف باسم «النفخ والنفث» (Huff and Puff). ويتم في هذه الطريقة حقن البخار في البئر لمدة أسبوعين، ويقوم البئر بعد ذلك بإنتاج النفط والماء المتكثف من البخار لمدة شهرين. وعندما تتناقص كميات الإنتاج إلى مستوى غير اقتصادي يصار إلى حقن جديد للبخار.

- ولغرض الحقن المستمر للبخار تستخدم نحو نصف الآبار كآبار لحقن البخار، وتستخدم البقية كآبار لاستخراج النفط الذي سخنه البخار وعمل على دفعه. والنمط النموذج للبئر هو ترتيب من خمس بقع سمّي تبعاً لترتيب النقاط الخمس على الزهر (النرد).

ويعبَّر عن أعلى نوع لهذا الترتيب بكلمة «المخمس» (Quincunx)، لكن هذا التعبير يبدو كثير التشامخ بالنسبة للعمال العاديين في الحقل النفطي.

تعتبر كثافة النفط مؤشراً مهماً لقيمته، فالنفط الخفيف أقرب إلى البنزين ويحتل مرتبة سعرية أعلى. إن القياس الاعتيادي للكثافة هو الكتلة في وحدة الحجوم أو الكثافة النوعية. لكن كثافة النفط على أي حال لها وحداتها التي وضع معاييرها معهد البترول الأميركي (American Petroleum Institute) وتعرف باسم «كثافة API» أو «درجات API»[1] (وذلك لأن API يضع المقاييس المعيارية لكل شيء تقريباً في الصناعة النفطية، وكان والذي معتاداً على القول بطريقة تهكمية: «ذلك ما يخص API» ، ويعني بذلك أن الأمور قد تعقدت كالمعتاد). يميل النفط الخام على المعدل أن يكون ذا كثافة تراوح حول 25° API. وتصل درجة النفوط الخام الأخف والأغلى سعراً إلى أعالي الثلاثينيات مع حد أعلى يبلغ 40° API، حيث تسمى المادة بعد ذلك متكثفات الغاز.

وينتج الحقلان الأكبر في كاليفورنيا، وهما ميدواي ـ صن سيت وكيرن ريفر، نفطاً ثقيلاً بكثافة 13° API. وتبلغ كثافة الماء في النهاية الأكثر ثقلاً 10° API. والنفوط ذات الدرجة الأوطأ من 10° API أثقل من الماء. وعند البحث عن نفوط بهذه الكثافة ستفشل تقنيات الاستكشاف الاعتيادية للبحث عن النفط العائم على المياه الجوفية.

ويميل النفط الثقيل، أي ذي الكثافة التي تقل عن 10° API إلى امتلاك لزوجة عالية. وتعكس اللزوجة مقاومة السائل للتدفق خلال الصخر المسامي. والسوائل ذات اللزوجة العالية تمتلك مقاومة عالية

---

(1) كثافة API = $\frac{141{,}5}{\text{كثافة المادة في درجة 60 ف}} - 131{,}5$.

للجريان وتتدفق ببطء شديد: للنفوط الثقيلة لزوجة عالية تفوق لزوجة الماء بعشرة الآف مرة. والتعريف يخالف تصورنا مرة أخرى، وقد أخطأتُ به مرات عدة. وتكون اللزوجة تحت 10° API عالية إلى درجة تجعل التدفق الاعتيادي داخل البئر شديد البطء، بحيث لا يكون اقتصادياً.

ترسبات الرمال القيرية

رغم أن ترسبات الرمال القيرية قد اكتشفت في ثلاثين قطراً حول العالم، ويبرز من بينها ترسبان يحويان من النفط يفوق كل احتياطي النفط العالمي المعروف في آبار النفط الاعتيادية، فهناك في الجزء الشرقي من ولاية ألبرتا في كندا وإلى الشمال مباشرة من نهر أورينوكو في فنزويلا ترسبات لرمال قيرية يعجز عن تصورها الدماغ. ويفضل الكنديون دعوة الترسبات لديهم برمال النفط الثقيل.

وكان أول إغراء لي عندما كنت طالباً هو محاولة تفسير هذه الترسبات كحقول نفطية عملاقة فائقة برزت قريبة من السطح، حيث تبخرت معظم الجزيئات الصغيرة (والأكثر قيمة اقتصادياً). والتفسير الأكثر احتمالية هو أن 90٪ من النفط المنحرر من صخور المنشأ (Source Rocks) لا يحتبس في المكامن النفطية، فهو ببساطة يهاجر إلى السطح. لذا، فإن الرمال القيرية الكندية والفينزويلية هي مواقع قرب السطح، حيث اقترب الجزء الذي يمثل 90٪ من النفط غير المكمني من أعماق الحوض إلى السطح.

ومن الممكن تعرّض النفط الخام في البيئة قرب السطحية إلى عدة أشياء، فيمكن للغاز الطبيعي وبعض جزيئات النفط الأخف أن تتبخر بسهولة. ويمكن للحياة الجوفية الضحلة أن تذيب عدداً من مكونات النفط. أما عوامل التغيير الأكبر فهي الباكتيريا، التي يمكن

أن تلقى مساعدة من بعض الفطريات. وما دام الأوكسيجين متوفراً، فإن غذاء الباكتيريا المفضل هو جزيئات البارافينات ذات السلاسل المفتوحة. وحتى في غياب الأوكسجين، فإن بعض أنواع الباكتيريا تقوم بتحوير النفط. وتبقى في النهاية المتبقيات غير القابلة للأكل، وهي مركبات تحوي هايدروكاربونات متعددة الحلقات. تؤلف صفيحة متصلة من الحلقات الكاربونية الغرافيت المعدني. وعندما أدعو هذه الأنواع متعددة الحلقات من جزيئات النفط «غرافيتي» أقابل بتأوهات صاخبة. والاسم الصحيح هو الإسفلت، أو القار، أو القطران، أو الزفت. لهذه المركبات الحلقية رائحة مميزة، لذا ندعوها بالمركبات الأروماتية (العطرية). وإذا ما صادف ومررت بالقرب من مجموعة عمال يقومون بتسخين القار لصبه على سطح بناية لجعلها مقاومة للماء فستصيبك هبة قوية من الأروماتيات. والعديد من هذه المركبات الحلقية، وليس جميعها، هي عوامل مسببة للسرطان. والمركب الأروماتي ذو الحلقة الواحدة المدعو البنزين(*) (Benzene) عامل مسرطن معترف به قانوناً في الولايات المتحدة. ورغم ذلك، فإن هذا المركب يؤلف نحو 30٪ من بنزين السيارات التجاري. ومع أخذ معايير السلامة الحالية بنظر الاعتبار، لن يسمح لهذا المركب إذا ما اختُرع اليوم أن يدخل في تركيب بنزين السيارات.

وفيما لو كنت محظوظاً وحصلت على امتياز لمنطقة من رمال النفط الثقيل الكندية وخمنت كيفية تعدين الرمال وكيفية استخلاص النفط الثقيل، فإنك بذلك فقط ستحصل على منتوج قابل للتسويق. ولزوجة النفط المستخلص ستكون أعلى من أن تتيح له الجريان في

(*) أرجو أن لا تشكل هذه التسمية إرباكاً للقارئ العربي مع وقود السيارات الذي اقتبسنا له في العربية التسمية الفرنسية الأصلية وهي بنزين. بينما يدعوه الأميركيون (غازولين) والبريطانيون (بترول) وحسب.

خط أنابيب. وإذا ما تمكنت من مزج النفط الثقيل مع مقدار مساوٍ له من النفط الخفيف، فإن النفط الخام الخفيف يأتينا مع الأسف من النهاية الأخرى البعيدة لولاية ألبرتا. ولكي تجعل الامتياز الذي حصلت عليه مربحاً يتطلب الأمر منك إنشاء جزء من مصفاة نفط عند منجمك للرمل النفطي لكي تحول القير إلى جزيئات أصغر يسهل جريانها حتى في برد الشتاء الكندي.

وتقوم مناجم الرمال النفطية الكندية الحالية بهذه المرحلة الأولية لعملية التكرير. وتقوم الطريقة الحالية بتكسير الأواصر بين ذرات الكاربون في جزيئات النفط الكبيرة، لكن الاستقرارية الكيميائية تتطلب ربط ذرة هيدروجين إلى كل ذرة كاربون جديدة انفصلت. وكان أرخص مصدر للهيدروجين فيما سبق هو الغاز الطبيعي لكن تجهيزات الغاز الطبيعي الآن بدأت بالتضاؤل.

أثاباسكا، ألبرتا، كندا

كانت لدى الأمم الأولى (الأميركيون الأصليون كما يعرفون سابقاً، أو الهنود الحمر كما كانوا يعرفون قبل ذلك) معرفة عن الرمال القيرية بامتداد نهر أثاباسكا. أما أول تفحص علمي للرمال القيرية فقد نشر سنة 1820. وتقع بعض الترسبات على السطح مباشرة. وإذا ما كان عمق الرمل القيري لا يتجاوز المائتي قدم، فمن الممكن الكشف عن الرمال وتعدينها بطريقة اقتصادية. أما النفط من الرمال الواقعة على أعماق أكثر من ذلك، فيجب أن يستخرج من خلال، ربما، استخدام مصطلح أدقّ (ثقوب الحفر)، وهو ما يدعى بالاستخراج الموقعي، أو في الموقع (in-situ production). دعنا أولاً نوضح طريقة الثقوب المحفورة، لأنها قريبة الشبه بآبار النفط التقليدية.

من الممكن تحريك النفط الثقيل باستخدام المذيبات أو الحرارة. وقد جُرِّب استخدام متكثفات الغاز مثل البروبان البيوتان كمذيبات، لكنها مكلفة. لذا، فإن التسخين باستخدام الحرارة يمثل التقنية المناسبة. وهناك طريقتان لاستخدام البخار لاستخراج النفط الثقيل جداً. في كندا، تدعى طريقة «النفخ والنفث» المستخدمة في كاليفورنيا باسم «طريقة الإثارة الدورية بالبخار» (Cyclic Steam Stimulation) أو CSS للاختصار. أما الطريقة الأخرى فتدعى SAGD، وهي مختصر لعبرة «التصريف الجذبي المعضد بالبخار» (Steam Assisted Gravity Drainage).

وتستخدم طريقة CSS آباراً عمودية محفورة إلى طبقة الرمال القيرية ومن ثم خلالها. وتشمل الدورة العادية الحقن بالبخار لمدة أسبوع يليه اسبوع آخر يسخُن فيه البخار المادة النفطية يتبع ذلك شهران من الإنتاج النفطي. وهناك عاملان يمكن أن يجعلا CSS مفضلة بالنسبة للطريقة الأخرى إلى SAGD وهما:

- إذا ما كان هناك طبقات من الحجر الطيني، فيفضّل استخدام CSS، فطبقات الحجر الطيني (الطَّفَل) قليلة السمك المترسبة بين الطبقات الرملية يمكن أن تجعل التدفق الأفقي أسرع كثيراً من التدفق العمودي. وكما سنرى فإن (SAGD) يعتمد كلياً على التدفق العمودي.

- إن طريقة (CSS) أكثر مرونة، فمُدد حقن البخار ومُدد دورات الإنتاج يمكن تنظيمها من خلال مراقبة أداء البئر.

- وتسود طريقة (CSS) في كندا اليوم، فشركة أمبيريال أويل (وهي متفرعة من شركة أكسون موبيل) تنتج 150000 برميل في اليوم بهذه الطريقة. أما طريقة (SAGD)، فقد أصبحت ممكنة من خلال تطور طريقة الحفر المائل. والغاية النهائية من طريقة الحفر المائل هي أن يحول قعر البئر إلى ثقب محفور أفقياً يتبع الرمل المنتج للنفط.

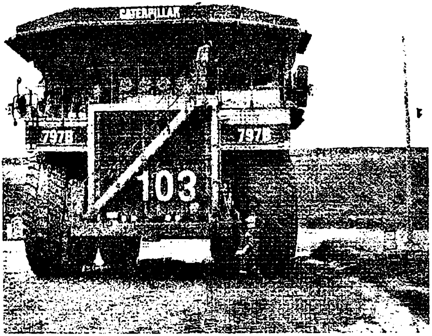
وقد طورت شركة أمبيريال طريقة لحفر ثقبين أفقيين أحدهما يعلو الآخر بخمسة عشر قدماً وحصلت على براءة لهذه الطريقة. ويتم حقن البخار في الثقب الأعلى، فيما يجري استخراج النفط المسخن والماء المتكثف من البخار من خلال الثقب الأسفل. وقد أجريت بضع اختبارات ناجحة لطريقة (SAGD) لكن الإنتاج على مجال واسع لا يزال ينتظر.

والأثر البيئي للإنتاج في الموقع، بما في ذلك (CSS) و(SAGD)، أثر بيئي أقل بالمقارنة مع التعدين لكن نسبة الاسترجاع واطئة. وعادة ما تكون هذه النسبة أقل من 20٪ من النفط المتواجد. وعلى أي حال، ولكون المصدر النفطي هائل الحجم، فإن العشرين بالمائة تبقى موضع أكثر من مرحب به، فعشرون بالمائة من رقم كبير لا تزال رقماً كبيراً.

ويُستخرج نحو ثلاثة أرباع النفط الثقيل في كندا بطريقة التعدين السطحي. وتنال المناجم دعاية أكثر بسبب حجم المعدات المرعب، فمنجم شركة شل الجديد الذي بدأ الإنتاج في النصف الأول من سنة 2003 يستخدم شاحنات من صنع كاتربيلار ذات سعة أربعمائة طن من الرمال القيرية. وتقوم مجارف عملاقة بغرف مائة طن في حمولة كل دلو من دلائها.

وكان تعدين الرمال القيرية قد بدأ سنة 1967 من قبل شركة (صن أويل)، وهي آخر الشركات النفطية الكبيرة المملوكة عائلياً. ورغم أن صن باعت مصالحها سنة 1995 إلا أن عمليات التعدين لا تزال تحتفظ باسم الشركة، إذ تدعى (صن كور إنرجي المحدودة). وكانت مبيعات النفط من منجم صن كور قد تجاوزت فيما سبق نفقات التشغيل، لذا فإن المنجم من تلك الناحية كان مربحاً. لكن الاستثمار المالي الأولي كان مع ذلك يستعاد بصورة بطيئة جداً،

فحتى وقت متأخر سنة 2001 كانت تكاليف التشغيل «باستثناء استعادة رأس المال» لاتزال موضع دعاية من قبل الشركات الأخرى[2].



شاحنة في منجم للرمال النفطية في ألبرتا (Alberta). وبإمكانها نقل أربعمائة طن من رمال النفط في تحميله واحدة (خدمات شل للتصوير (Shell Photographic Services)، شركة شل العالمية (.Shell International Ltd))

وكانت رمال ألبرتا للنفط الثقيل تنتج سنة 2002 نحو ثلث إنتاج كندا النفطي، وهي نسبة لا تزال في ارتفاع. وهناك كميات وفيرة من الرمال القيرية، أي ما يزيد عن تريليون برميل من النفط التقليدي، وهو شيء واعد وربما يكون سبباً للاحتفاظ بسيارة العائلة الكبيرة. لكن ذلك ليس بالأمر الهيّن على أي حال:

ـ فعمليات الرمال النفطية الحالية مستخدم رئيسي للغاز

(2) انظر مثالاً ذلك: Keith Skipper, *Petroleum Resources of Canada in the Twenty - First Century*, Memoir 74 (Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 2001), Caption to Figure 6, p. 119.

الطبيعي، والطاقة اللازمة لإنتاج الماء الساخن، أو البخار، وكذلك الهيدروجين المطلوب لتحسين النفط، تأتي على الأغلب من الغاز الطبيعي. وكان الغاز الطبيعي قبيل سنة 1980 ذا سعر مناسب جداً حسب تسعيرة منتجي النفط التقليديين. ولم تعد الحالة كذلك، كما بينا في الفصل الرابع، فقد كان هناك خلال شتاء 2002 ـ 2003 على وجه التخصيص، ارتفاعٌ في الطلب على الغاز الطبيعي وفي أسعاره. وستكون عمليات الرمال ـ النفطية الجديدة، وكذلك الحالية، أقل ربحاً بكثير مع أسعار الغاز الطبيعي المرتفعة.

ـ إن الماء، وهو مقوم رئيس في التعدين السطحي وفي عمليات الإنتاج «في الموقع»، له حدوده أيضاً، فمعظم الماء يمكن إعادة تدويره، ورغم ذلك ستبقى هناك إزالة صافية للماء السطحي أو الماء الجوفي. يضاف إلى ذلك هموم بيئية حول التخلص من الماء بعد استخدامه في عمليات استخراج النفط.

ـ إن اقتصاديات المقياس ذات أهمية حيوية في عمليات التعدين السطحي، فرغم أن أجور سائق شاحنة هي واحدة، أكان يسوق شاحنة سعة 10 طن أو شاحنة سعة 400 طن، إلا أن الكلف الرأسمالية تختلف بصورة مثيرة. ويتطلّب المقياس الهائل استثماراً يتراوح بين 2 مليار إلى 5 مليار دولار قبل تسليم أول برميل من النفط. وهذا يحدد عدد المساهمين الممكنين. كما أنها تجعل اللاعبين المتوقعين حذرين، ففي أوائل سنة 2003 أجّلت شركتان إلى تاريخ غير محدد خططهما لمناجم جديدة للرمال النفطية.

ـ إن البنى التحتية المتوفرة لبناء وسائل إنتاجية جديدة محددة، فليس من الكياسة أن نعتبر اللحامين ومهندسي الإنشاءات جزءاً من البنى التحتية، لكن العدد الكلي من الناس المدربين لبناء مصانع رئيسية جديدة يصعب توسيعه، فبلدة فورت ماكمري ذات الثلاثين

ألف نسمة الواقعة على بعد مائتي ميل إلى شمال شرق إدمونتون، هي البلدة الوحيدة ذات الحجم المعتبر في منطقة الرمال النفطية. وأنت لا تستطيع بناء وسائل تصنيع تكلف 4 مليار دولار بتعليق إعلان لطلب العمال في فورت ماكمري.

وتخميني هو أن خيار CSS للاستخلاص في الموقع هي الطريقة التي سيتوسع استخدامها على المدى القصير، فالاستثمار الإضافي في بئر واحدة قليل بما فيه الكفاية ليتيح مشاركة واسعة. أما المعدات وطرق العمل فهي ليست غريبة أو دخيلة. وسيكون أكبر تحسين من نصيب إعادة تصميم طريقة العمل لتقليل الاعتماد على الغاز الطبيعي إلى الحد الأدنى.

أورينوكو، فنزويلا

يقع «حزام القار» (Cinturón de la brea) على الساحل الشمالي لنهر الأورينوكو. وتقديرات موجوداته تشارف الـ 1,2 تريليون برميل، وهي تقارَن بما هو موجود في كندا، وتفوق كل إنتاج العالم التراكمي من النفط حتى هذا التاريخ. ورغم أن الاهتمام بحزام النفط الثقيل يعود إلى الثلاثينيات، إلا أن الإنتاج الفعلي لم يبدأ حتى سنة 1988. بلغ إنتاج النفط الثقيل في فنزويلا سنة 1999 نحو 54000 برميل/ اليوم، وهو يساوي نحو 10 بالمائة من حجم الإنتاج الكندي. ويتوقع أن ترفع المشاريع قيد الإنجاز الطاقة الإنتاجية إلى ما مجموعه 500000 برميل في اليوم، لكن عدم الاستقرار السياسي في فنزويلا قد ينتج عنه بعض التأخير.

وكل مشاريع النفط الثقيل الأربع في فنزويلا هي مشاريع مشتركة بين شركات النفط العالمية وPDVSA (شركة النفط الوطنية الفنزويلية). والرمال القيرية في فنزويلا، كما في كندا، قريبة من

السطح، لكن معدل درجة الحرارة الأعلى في فنزويلا مقارنة بكندا يجعل الآبار المحفورة ملائمة بدرجة أكبر من التعدين السطحي.

واحتوت النفوط الفنزويلية الثقيلة عند اكتشافها الأولي نحو ثلاثمائة جزء بالمليون من الفناديوم. الفناديوم؟ نعم، فنفناديوم مصدره المناجم ذات الصخور الصلبة، وأكثر استخدام له هو في صنع سبائك الصلب المتينة، فما دخل الفناديوم في النفط؟ ولأن النفط الخام يأتينا من التكسر الحراري للمادة النباتية والحيوانية نجد فيه «متحجرات جزيئية» تشمل متروكات يمكن تمييزها من الكلوروفيل النباتي والهيموغلوبين الحيواني. وهذه الجزيئات فيها بنى متشابهة ذات حلقات مسطحة متكيفة بصورة خاصة للإمساك بذرة معدنية وسط الحلقة، وهي الحديد في حالة الهيموغلوبين والمغنيسيوم في حالة الكلوروفيل. ونجد في معظم أنواع النفط الخام النحاس والنيكل والفناديوم في هذه الحلقات وبكميات ضئيلة. والنفوط الثقيلة هي المتبقي بعد أن تكون الباكتيريا قد انتهت من غذائها وهي ليست مولعة بالحلقات الحاوية على المعادن. والنفوط الفنزويلية الثقيلة غنية على وجه التخصيص بالفناديوم[3].

وستبرز مشكلة كبرى إذا ما أحرقنا وقوداً يحتوي على الفناديوم في التوربين الغازي، فالمخلفات اللزجة ستتجمع على شفرات التوربين. والأدهى من ذلك أن الفناديوم يعمل كعامل حفاز، وتقوم المادة اللزجة الغنية بالفناديوم بتحويل الكبريت الموجود في الوقود

(3) تكون الأيونات الكيميائية ذات الشحنتين الموجبتين مثل المغنيسيوم متآصرة بقوة في وسط الحلقة الهيدروكاربونية في الكلوروفيل. ويحمل الفناديوم عادة شحنة (+6) لكن عندما يتحد مع ذرتي أوكسجين فإن معقد الفاناديل (VO_2 + +) يتآصر بصورة جيدة كبديل للمغنيسيوم.

إلى حامض كبريتيك، وهو كما رأينا سابقاً يتلف الأجزاء المعدنية(*). ويجري بدل القيام بعملية إزالة الفناديوم من النفط المعقدة والمكلفة استخدام مضافات الوقود التي تعمل على إذابة الترسبات المنصهرة للفناديوم والتخلص منها بإرسالها خلال غازات العادم.

وقد قام الذراع البحثي في شركة النفط الفنزويلية بالتعاون مع شركة بي بي بابتداع طريقة ذكية لإنتاج وتسويق النفط الفنزويلي الثقيل، فقد طوروا خلال الثمانينيات مستحلباً (emulsion) يتألف من 70 بالمائة من النفط الثقيل و 30 في المئة من الماء وكمية قليلة من مساحيق التنظيف، وقموا بتسويقه وبيعه. وهذا المزيج الذي يعرف بسم أوريملشن (orimulsion) يمكن أن يرسل خلال الأنابيب أو خلال السفن الناقلة للنفط، ويتم استخدامه في مراجل محطات الطاقة الكهربائية التقليدية العاملة بالبخار، ولا يؤثر الماء الموجود فيه على النار أو يطفئها. ويمكن لمستحلب النفط والماء هذا أن يصبح النوعية السائدة لنفط فنزويلا الثقيل المصدر.

جرى إدخال عملية تحسين النفط الفنيزويلي الثقيل إلى نفط خفيف قليل الكبريت من خلال مشروع مشترك بين شركة النفط الوطنية الفنزويلية وشركة توتال الفرنسية (وتوتال هي الشركة التي تشكلت بعد اندماج توتال وفينا وإلف أكيتين). وعملية تحسين النفط الثقيل الفنزويني موازية لعملية مماثلة في كندا.

(*) يسبب الفناديوم في الوقود ما يعرف بظاهرة التآكل الساخن (Hot Corrosion) وسببه هو أن الرواسب المنصهرة لأكسيد الفناديوم الناتج عن احتراق الفناديوم في الوقود تخرب الغشاء الأكسيدي الذي يوفر الوقاية للسبيكة المعقدة (النايمونيك) لشفرات التوربين. وما يحدث بعد ذلك أكثر تعقيداً من التآكل بحامض الكبريتيك ويشمل في أولى مراحله استنزاف الكروم من السبيكة يلي ذلك تأكسد بقية مكونات السبيكة. وتزداد فعالية الفناديوم إضعافاً بوجود الصوديوم في الوقود.

مستقبل النفوط الثقيلة

يشكل النفط الثقيل المستخرج من مختلف المصادر اليوم نحو 8 في المئة من مجمل نفط العالم المنتج. ومصادر النفط الثقيل كبيرة، كما أن هذا النفط عند تحسينه يصبح ملائماً للاستخدام في سياراتنا وشاحناتنا وطائراتنا الحالية. وسيكون هناك ضغط هائل لزيادة إنتاجه مستقبلاً.

ـ يجب مراقبة سهولة وصول المنتجين المتوقعين للنفط الكندي إلى الماء والغاز الطبيعي وقابليات التشييد، مع الأمل بأن لا تمنع أي نقيصة توسيع الإنتاج الحلي للرمال النفطية. أن توفر الغاز الطبيعي بسعر مضمون قد يكون الأصعب تحقيقا والأكثر أهمية، فمن الذي يرغب أن يستثمر 4 مليارات دولار في منشآت ثم يراها تصبح غير اقتصادية بسبب ارتفاع أسعار الغاز الطبيعي؟

ـ هناك مجال كبير للإبداع في تطوير أساليب أفضل للاستخراج «في الموقع». وتتضمن إحدى المشاريع الطموحة تحسين نوعية النفط في المكامن تحت الأرض قبل استخراجه. ويجب أن تبرهن طريقة SAGD على إمكانياتها المتوقعة. وتقترح إحدى المجموعات اليابانية حقن بخار متقطع في الثقب السفلي الذي يمثّل عادة قناة الاسترداد.

ـ إن عملية استخراج النفط الثقيل هي مستهلك رئيس للطاقة. ولكي نتجنب استهلاك جزء من النفط الثمين لتأمين استخلاصه هو ذاته هناك نقاش حول تنصيب منشأة طاقة شمسية بقوة 500 كيلوواط في حقل ميدواي ـ صن سيت في كاليفورنيا. أما الرمال النفطية الكندية فبإمكانها استخدام الحرارة والطاقة من مفاعل نووي.

ـ هناك مجال لبعض التهجين، فتوليد الهيدروجين لتحسين

النفط ينتج عنه ثاني أوكسيد الكاربون الذي يطلق خلال المداخن في الجو حالياً. ويمكن لثاني أوكسيد الكاربون أن يستخدم ويعاد تدويره عدة مرات كمساعد في استخراج النفوط غير التقليدية. ويكمن التحدي في الرجوع عما نفعه الآن والبحث عن ترتيبات مثالية للنظام بكامله.

سيكون من المناسب جداً لو أن إنتاج النفط الثقيل تزايد دون أي إعاقات ليعوض عن التناقص في إنتاج النفط التقليدي بعد ذروة هبرت، وسيكون تدفقٌ متزايدٌ من النفط الثقيل الأفضلَ ضمن عوالم ممكنة، ما سيجنب إعادة ترتيب سلسلة تجهيز الطاقة لدينا. وقد أدرج إنتاج النفط الثقيل من كاليفورنيا وكندا وفنزويلا في الخطوط البيانية للإنتاج في منحنيات الإنتاج في الفصل الثالث. ولا يجري الآن إدخال الرمال القيرية ورمال النفط إلى الإنتاج بنفس سرعة تدهور الإنتاج للنفط التقليدي خارج الشرق الأوسط. وعندما يتجه الشرق الأوسط نحو طور تدهور الإنتاج سيتطلب الأمر استثماراً سريعاً وهائلاً في وسائل الإنتاج في الرمال القيرية. إن الخطوات التمهيدية لاستحصال تراخيص الحكومات والرأسمال الاستثماري وإمكانيات التشييد لا تسير قدماً حسبما أعتقد بمقياس واسع بدرجة تؤجل حدوث ذروة هابرت.

الفصل السابع

السجّيل النفطي(*)

لقد أصبح شيئاً تقليدياً أن تبدأ جميع النقاشات حول هذه المادة بالقول «إنه ليس نفطاً، كما أنه ليس نوعاً من الصخر». والسجّيل النفطي ببساطة هو صخر منشأ غير ناضج للنفط، أي أنه لم يتعرض لحرارة كافية ليدخل النافذة النفطية. وإذا لم تكن المعالجات الطبيعية قد طبخت صخرة غنية بالعضويات فلا يزال بإمكاننا أن نطبخها (وسنقول أكثر من هذا عن وصفات الطبخ لاحقاً). وهناك سبب للمحاولة: وبلغة الأرقام، فإن طناً واحداً من صخر السجّيل سيولد برميلاً واحداً من النفط. وإذا ما كان سعر برميل النفط 25 دولاراً، فذلك يعني 25 دولاراً لطن الصخر. والذهب المربح بصورة معقولة يحوي ما قيمته 12 دولاراً من الذهب في طن من الخام. وإذا ما كان نفط السّجيل ذا قيمة تساوي ضعف قيمة الذهب، فلماذا لا يغتني بعض الناس منه؟ لكن بعضاً من أكبر الشركات قد خسرت في محاولتها استغلاله.

(*) وقد ترجم في العربية أيضاً بتسميات أخرى، مثل زيت الطفل أو الزيت الحجري.

ترسب السّجيل النفطي في بيئة تفتقد الأوكسجين المطلوب لأكسدة المادة العضوية. ولم يقتصر الأمر على افتقاد الأوكسجين فقط، فبعض الباكتيريا الملائمة تستطيع أكسدة المادة العضوية مستخدمة الكبريتات من الماء. لذا استوجب الأمر أن يكون الماء الجوفي فوق الترسبات ذا محتوى واطئ من الأوكسجين والكبريتات. وكانت كل صخور المنشأ للنفط في العالم وكذلك صخور السجّيل النفطي قد ترسبت في بيئة غير عادية خالية من الحياة.

والغريب في الأمر أن هذه البيئة الخالية من الأوكسجين و«الميتة»، هي وسطٌ ممتاز لدراسة الحياة القديمة[1]؛ فأي جسم ميت يقع في مياه القعر المستنفدة الأوكسجين (والمستنفدة الكبريتات كذلك) سيحفظ سليماً، فالعظام لن تبعثرها الضواري التي تأكل اللحم. ويتم كذلك في بعض الأحيان حفظ الأنسجة اللينة التي لا تظهر بتاتاً في المتحجرات العادية. والأماكن القليلة، حيث احتفظ باللحم والجلد، مثلما احتفظ بالعظام معروفة وشهيرة: صخور الطَّفَل في برجيس (Burgess Shale) والحجر الكلسي لزولنهوفن (Solenhofen Limsceton)، والسجّيل النفطي في نهر كرين (Green river Oil Shale).

وتقوم مجموعة من الديدان والحشرات الزاحفة في الرواسب الاعتيادية، حيث يتوفر الأوكسجين على وجه التقاء الماء والرواسب بالحفر خلال الراسب بحثاً عن شيء تتغذى به. وهناك قبل أن تبدأ الديدان بالحفر ما يدعى بالأساس وهو طبقات عادية في الترسبات.

---

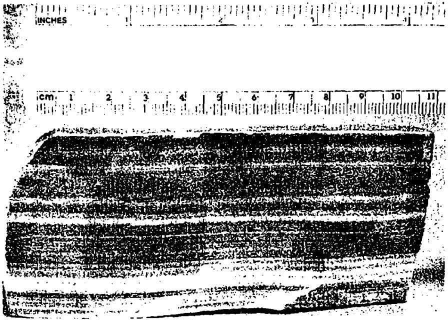
(1) انظر: David Bottjer, *Exceptional Fossil Preservation: A Unique View on the Evolution of Marine Life* (New York: Columbia University Press, 2002).

وكل الترسبات تبدأ بأساس، فمن المستحيل أن تسكب الرمل في خزان مملوء بالماء من غير أن يتولد عن ذلك طبقات واضحة للعيان. وإذا لم يكن هناك أوكسجين ولم يكن هناك حياة فستبقى الطبقات محفوظة بطريقة جميلة، ولا من ديدان لتحفر خلالها. لكن هناك عدد قليل من الصخور الرسوبية ذات الطبقات وفيها ثقوب ديدان واضحة. وعلى أي حال، فإن معظم الصخور الرملية والكلسية تمتلك هيئة متماسكة، ولا أثر للطبقات فيها أو لثقوب الديدان. ومن المعتاد أن تكون الصخور الرملية والكلسية المتماسكة قد ثقّبت مراراً بتلك الدرجة بحيث تصبح بنيتها شبيهة بالبطاطا المهروسة. وأقوى الأدلة على التنقيب الشديد هو عدم وجود ثقوب ظاهرة وعدم وجود طبقات ظاهرة. ويتألف الموقف العادي من ترسبات عادية مثقبة سمكها الآف الأقدام تضم بضع طبقات سمك الواحدة منها يتراوح بين عشرة وثلاثين قدماً تحتوي ما يكفي من المادة العضوية لتكون سجّيلاً نفطياً أو صخراً منشأ.



أفعى متحجرة محفوظة بتفاصيلها الدقيقة لأن العضويات التي تقتات على المواد الحية لا تعيش في قعر بحيرات غرين ريفر الخالية من الأوكسجين.

ويكون السجّيل النفطي البحري وصخور المنشأ النفطي مترسبين عادة في مصائد مغذية، مثل ذراع من البحر فيه ما يكفي من مدخول الماء العذب ليجعل الماء السطحي (بدل الماء العميق) يخرج من الحوض. وتسقط الأجسام الميتة ومعظمها ذات حجم مجهري من المياه السطحية حاملة معها مغذياتها الكيميائية الداخلية. وتتراكم المغذيات في المياه العميقة. وإذا ما كان الماء السطحي هو الذي يترك الحوض، وكان الماء في الأعماق هو الذي يدخل، فسيكون الحوض مصيدة للمغذيات. وليس من المستغرب أن الترسبات المتراكمة في مصيدة المغذيات تحوي المغذيات إضافة إلى المادة العضوية. إن وجود المغذيات غير العضوية مثل الفوسفور والنايتروجين دليل مهم لأصل صخور المنشأ النفطية ومماثلتها غير المسخنة، أي السجّيل النفطي.



ربما تكون الطبقات الرقيقة ضمن السجّيل النفطي في غرين ريفر (Green River) مترسبات سنوية مثل حلقات الأشجار. إن الحفاظ على الطبقات الرقيقة يظهر أن الحيوانات التي تحفر في القعر كانت غير موجودة.

إن كيس من سماد الحدائق الاعتيادي سيخبرك بالنسبة المئوية للنايتروجين والفوسفور والبوتاسيوم التي يحويها. والبوتاسيوم متوفر ومبتذل في ماء البحر، أما النايتروجين والفوسفور فهي شحيحة في معظم الأحيان. ويوجد مثال للطبقة الحاوية للمواد العضوية وللمغذيات في وايومنغ ومونتانا وأيداهو. وتدعى الوحدة «تشكيل الفوسفوريا»، وهي من العصر البرمي (أي قبل 260 مليون سنة). وقد ولدت المادة العضوية نفطاً حيثما كان تشكيل الفوسفوريا قد دفن في عمق كافٍ ليقع ضمن النافذة النفطية (7500 ـ 15000 قدم). وقد جاءنا نحو نصف النفط المنتج في وايومنغ من الفوسفوريا. أما حول مدينة ديلون في جنوب غرب مونتانا، فإن الفوسفوريا لم تصل إلى النافذة النفطية، وتحولت الطبقات الغنية بالمادة العضوية نتيجة ذلك إلى سجّيل نفطي. وبالنسبة للمغذيات هناك مناجم رئيسية في جنوب شرق إيداهو يستخرج منها الفوسفات كسماد.

وهناك نايتروجين أيضاً بهيئة معادن تحوي إيونات الأمونيوم (NH^{+}_{4}). وكانت كميات قليلة من نوع غريب من المادة المعدنية المسماة «فيلدسبار» (feldspare) قد اكتشفت في كاليفورنيا سنة 1964 ضمن ترسبت في نبع ساخن. واحتوى هذا النوع من الفيلدسبار الأمونيوم، بدل الصوديوم أو الكالسيوم أو البوتاسيوم كما هي العادة. ودعي الخام المعدني هذا «بدنغتونايت»، تشريفاً لـ أ. ف. بدنغتون (A. F. Buddington)، واتفق من كانوا طلاباً عند (الدكتور بد) على أنه استحق هذا التشريف بجدارة، حتى إذا كان هذا الخام المعدني نادراً. لكن البدنغتونايت لم يبق نادراً لمدة طويلة، فبحر الفوسفوريا كان يحتبس فيه النايتروجين مثلما يحتبس الفوسفور. وهناك ثلاثة مليارات طن من البدنغتونايت في تشكيل الفوسفوريا[2].

(2) انظر: R. A. Gulbrandsen, «Buddingtonite, Ammonium Feldspar in the =

وكخلاصة: فإن الفوسفور والنايتروجين المبتذلين في تشكيل الفوسفوريا يعضدان الفرضية القائلة إن المادة العضوية تولدت واحتفظ بها في مصيدة مغذيات.

التاريخ

سنقدم الآن المكافأة للقطر الذي أنتج تاريخياً أكبر قدر من النفط من السجِّيل النفطي. أعطني المظروف رجاء. افتحه، انفخ والفائز هو 10000 إيستونيا! ولماذا؟ لأن إيستونيا لديها سجّيل نفطي ولا يوجد لديها إنتاج نفطي ولجأت إلى استخدام ما كان لديها. وكانت مناطق أخرى مثل إسكتلندا والسويد قد أنتجت النفط من السجِّيل في أوقات سابقة.

وقد أنتجت النفط من السجِّيل نحو ثلاثين دولة وثماني ولايات في الولايات المتحدة. وعندما أغرَق بئر سبندلتوب قرب بومونت في تكساس سنة 1901 العالم بالنفط الرخيص توقف الجميع عدا إيستونيا عن إنتاج النفط من السجِّيل. لكن المنظر من ذروة هابرت لا يولد هجمة نفطية نحو إيستونيا والمكافأة الثانية ستذهب للقطر الذي يمتلك أكبر احتياطي من السجِّيل النفطي. مزق المظروف وانفخ والفائز هو. . . الولايات المتحدة، لامتلاكها السجِّيل النفطي في غرين ريفر. وكان هذا السجِّيل متدلياً فوق رأس الصناعة النفطية التقليدية منذ كنت صبياً يافعاً. وعندما كان سعر برميل النفط 3 دولارات اعتقد الكثير من الناس أن سعر النفط عندما يصل إلى 8 دولارات للبرميل سيتيح للسجِّيل النفطي في غرين ريفر أن ينتقم من

Phosphoria Formation, Southeastern Idaho," *U. S. Geological Survey Journal of Research*, vol. 2 (1974), pp. 693-697.

سبندلتوب وان يقفل أبواب صناعة النفط. أما الآن، وبأسعار أعلى جداً للنفط، يترتب علينا أن نلقي نظرة أعمق على غرين ريفر.

أكثر مما أردت أن تعرفه عن غرين ريفر

أن ترسبات السجّيل النفطي في غرين ريفر كبيرة وكبيرة جداً. وإذا ما سخن السجّيل، فإن النفط الذي سيعطيه سيفوق كل النفوط في حقول الشرق الأوسط. وتحتوي ترسبات غرين ريفر نحو 60 بالمائة من مجمل السجّيل النفطي في العالم.

وتقول القصة في وايومنغ أن السجّيل النفطي اكتشف عندما قامت مجموعة من عمال البناء المشاركين في مشروع يونيون باسيفيك للسكك الحديد سنة 1869 بوضع دائرة من الصخور حول نار الطبخ التي أوقدوها وسرعان ما التهبت الصخور. أما قصة كولورادو فهي أكثر تشويقاً، فيقال إن رجلاً بنى كوخاً من جذوع الأشجار وبنى فيه موقداً للنار ومدخنة من حجر أسود وجده محلياً. وخلال حفلة تدشين منزله أوقد ناراً في الموقد ونتيجة ذلك احترق الموقد والمدخنة والكوخ بكامله.

ولازلنا نبحث عن قصة من ولاية يوتا، وذلك لأن السجّيل النفطي في غرين ريفر يحتل منطقة حيث تلتقي ولايات وايومنغ ويوتا وكولورادو. والتسمية جاءت كما هو متوقع من غرين ريفر ونهر غرين، وهو نهر يجمع مياهه من تلك المنطقة ويصب في النهاية في نهر كولورادو. وليس من المؤكد تماماً ما إذا كانت تشكيلة غرين ريفر قد ترسبت في حوض واحد متواصل، أو أنها تشكلت في أربع أحواض منفصلة.

ومتحجرات غرين ريفر كما ذكرنا سابقاً محفوظة بصورة مدهشة، وهناك أفعى وسلحفاة وحتى خفاش. وكنت في إحدى

السفرات الحقلية الجيولوجية قد أخذت إلى هيلز هول في يوتا، حيث كان المميز فيها هو الحشرات المتحجرة. وتوقفنا في السفرة الحقلية لمدة ساعة ليتيحوا لنا جمع بعض الحشرات. أما متحجرات الأسماك، فهي مبتذلة على وجه التخصيص في وايومنغ، بحيث إن آلافاً منها قد بيعت إلى السواح بسعر يبلغ بضع دولارات للواحدة. ويعتبر موقع فوسل بيوت (Fossil Butte) الآن صرحاً وطنياً.

وتخبرنا المتحجرات شيئين إضافيين: أن الترسبات في غرين ريفر ليست ذات أصول بحرية، وأصلها ترسبات في بحيرة (أو بحيرات)، إذ ليس هناك من سمك قرش أو قنافذ بحرية. والغريب هنا هو الأصل غير البحري، لأن معظم السجّيل النفطي وصخور المنشأ النفطية ذات أصول بحرية.

ورغم أن بحيرات غرين ريفر لم تكن مرتبطة بالمحيط، إلا أنها لم تكن بحيرات مياه عذبة مثل البحيرات العظمى(*)، فكر بدل ذلك ببحيرة الملح العظيمة(**) اليوم، ولكن بمساحة تفوقها عشرة مرات. ومع ذلك فإن بحيرات غرين ريفر القديمة كانت لها كيمياء تختلف عن كيمياء بحيرة الملح العظمى.

لقد كانت إحدى الأوراق العلمية الكلاسيكية التي كنت أطلب من الطلاب قراءتها قد كتبت من قبل لورنس هاردي (Lawrence Hardie) وهانز يوجستر[3] (Hans Eugester)، اللذين يشرحان كيمياء

(*) البحيرات العظمى هي مجموعة بحيرات سوبيريوروميتشيغان وهورن وأونتاريو وايرى التي يمر من خلالها نهر سانت لوران بين كندا والولايات المتحدة.

(**) بحيرة الملح العظمى هي بحيرة في ولاية يوتا تقع عليها مدينة (سولت ليك سيتي) المسماة باسمها.

(3) انظر: Lawrence Hardie and Hans Eugster, «The Evolution of Closed-Basin Brines,» *Mineralogical Society of America*, Special Paper 3 (1970), pp. 273-290.

مياه البحيرة من خلال مفهوم «أي منها سينفذ» أولاً، فعندما يتبخر ماء البحيرة أو ماء البحر على سبيل المثال، سيبدأ الماء بترسيب كبريتات الكالسيوم بهيئة مادة الجبسوم المعدنية ($CaSo_42H_2O$). وسيستمر الجبسوم بالترسب حتى يستنفد كل الكالسيوم أو كل الكبريتات. ومن غير المتوقع أن الماء الأصلي احتوى نفس المقدار من الكالسيوم (Ca) بالضبط، والذي يعادل الكبريتات (So_4) الموجودة فيه، فماء البحر الحالي مثلاً يحوي من الكبريتات أكثر من الكالسيوم، لذا فإن ترسب الجبسوم سينتهي عندما ينفد كل الكالسيوم وسيكون الماء المتبقي غنياً بالكبريتات. أما إذا بدأنا بكمية من الكالسيوم أكثر من الكبريتات، فستكون الصورة معكوسة، وسننتهي بماء خال من الكبريتات وغني بالكالسيوم بعد التبخر. وقام هاردي ويوجستر برسم شجرة بفروع قسمت كل وقت نفد فيه أحد المكونات ووضعا في نهاية الفروع أسماء البحيرات الحديثة بكيميائياتها المناسبة. والشيء الغريب أن بحيرة الملح العظيمة تتشارك في نفس الفرع مع محيطات العالم اليوم.

أما الماء في بحيرات غرين ريفر القديمة التي تعود إلى حقبة الأيوسين، فهو مختلف كيميائياً عن ماء المحيطات الحديثة. وتشبه بحيرات غرين ريفر القديمة البحيرات الحديثة في وادي الصدع الشرقي في كينيا وتانزانيا إلى حد ما، فكلاهما مصدر لكميات ثمينة تجاريا من كاربونات الصوديوم، إذ إن نصف كمية كاربونات الصوديوم التي تستخرج من مناجم العالم مصدرها الجزء الواقع في وايومنغ من بحيرات غرين ريفر. وتستخدم هذه المادة في صنع الزجاج ومنتجات غسيل الملابس وصناعة الورق، وفي تشكيلة من المنتجات الكيميائية. والمادة في العلبة الصفراء المألوفة التي تحمل صورة الأذرع والمطرقة لصودا الخبز تأتينا من كاربونات غرين ريفر.

وقد قلنا في المقطع السابق «إلى حد ما»، لأن بعض أوجه كيمياء غرين ريفر لا مثيل حديث لها، فهناك تسعة أنواع من المواد المعدنية على الأقل نجدها في السجّيل النفطي في غرين ريفر، مما لا نجده في أي مكان آخر على سطح الأرض[4]. وهناك خمس أنواع أخرى من المواد المعدنية في غرين ريفر نجدها في مواقع أخرى على سطح الأرض لكنها لا تأتينا من ترسبات لبحيرات بل من مواقع غير اعتيادية في صخور تكونت من درجات حرارية عالية، فمادة الليوكوسفنايت (Leukosphenite) نجدها في تشكيلات غرين ريفر وفي صخر ناري غير اعتيادي في جنوب غرب غرينلاند فقط، وليس في أي موقع آخر. وتحتوي المواد المعدنية غير الاعتيادية في غرين ريفر على وجه التخصيص البورون او الفلور غالباً ويفترض أن يعلمنا هذا بأن مياه البحيرات حوت تركيزات مهمة من هذين العنصرين.

ولنلخص الأمر: في زمن محدد (خلال الجزء المتأخر من حقبة الأيوسين) وفي منطقة محددة (نحو تسعين ميلاً مربعاً) ترسب نوع غريب كيميائياً من السجّيل النفطي الذي يمكن أن يعطينا كمية من النفط تفوق الموجودة منه في الشرق الأوسط. ولا يجب أن نستغرب أن هذا المنتوج الغريب جاء من خلفية غريبة.

وقد أشار كل من إلدردج مورس (Eldridge Moores)، أستاذ الجيولوجيا في جامعة كاليفورنيا في ديفيس، ويلدريم ديلاك (Yildrim Dilek) أستاذ الجيولوجيا في جامعة ميامي بأوهايو منذ بضع سنين، إلى أن جبالاً تصل بارتفاعها علو هضبة التبت كانت موجودة

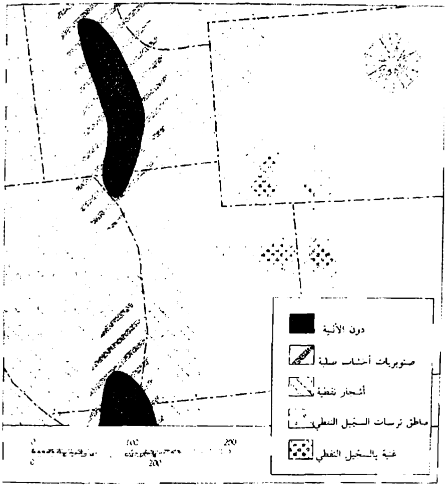
(4) انظر: Charles Milton and Joseph Fahey, «Green River Mineralogy - A Historical Account,» *Wyoming Geological Association Guidebook* (1960), pp. 159-162.

في شرقي نيفادا خلال حقبة الأيوسين[5]. ولم ينل توكيدهما هذا الاهتمام الكافي، وسبب ذلك يعود جزئياً إلى أن مورس يأتي أحياناً بالعديد من الأفكار الغريبة، فهو يضع مثلاً قارة القطب الجنوبي مقابل الجزء الغربي للولايات المتحدة في عصر ماقبل الكامبري المتأخر. لكنه - أي مورس - ليس بالشخص غير السوي، فقد كان قبل بضع سنين رئيس الجمعية الجيولوجية الأميركية. وسنترك على أي حال أفكار مورس الذكية الأخرى جانباً ونركز على شرق نيفادا وغرب يوتا.

فإذا ما كانت هناك هضبة بارتفاع هضبة التيبت في نيفادا وغرب يوتا خلال الأيوسين، فإن بحيرات غرين ريفر كانت موجودة في منطقة شديدة الجفاف محجوبة عن المطر. وحجب المطر الذي نعرفه جميعاً تسببه السييرا نيفادا (سلسلة جبلية)، فالهواء في الريح الغربية السائدة يبرد عندما يرتفع إلى السطوح الغربية للسييرا نيفادا حيث يهطل منه المطر أو الثلوج. وبعد أن تعبر الريح السييرا نيفادا لن ترجع إليها رطوبتها ويبقى الجزء الأكبر من ولاية نيفادا صحراء تملأها الأشواك. لقد كانت تلك المنطقة في عصر الأيوسين على خط عرض 35 شمالاً، لذا فإن الرياح الغربية يجب أن تكون قد سادتها. وإذا ما كانت الهضبة من عصر الأيوسين أعلى من السييرا نيفادا الموجودة، اليوم فإن المنطقة إلى الشرق منها ستكون أجف من صحراء تكسوها الأشواك.

---

(5) انظر: Yildram Dilek and Eldridge Moores, «A Tibetan Model for the Early Tertiary Western United States,» *Journal of the Geological Society*, vol. 156 (1999), pp. 929-941.



كان السجّيل النفطي في منطقة غرين ريفر قد ترسب في مناخ جاف أثناء عصر الأيوسين. ويخمن وجود سلسلة جبال رئيسية في أيداهو وشرق نيفادا، وذلك بالاستدلال من أوراق نباتية متحجرة. وعند خط العرض القديم ذلك كانت الرياح السائدة من الغرب إلى الشرق لذا كان هناك منطقة محجوبة عن المطر في كولورادو ويوتا وو يومنغ حيث توجد ترسبات السجيل النفطي الآن (جيفري ل. وارد (Jeffrey L. Ward)).

تدعى معظم نيفادا والنصف الغربي من يوتا «مقاطعة الحوض والسلسلة» (Basin and range province)، لأنها مقطّعة إلى أجزاء بواسطة التصدعات الجيولوجية. وهناك ميل غير موفق للتفكير بها

كمقاطعة متجانسة واحدة. لكن السلاسل والأحواض على أي حال تمرّ عبر جيولوجيا سالفة وشديدة الاختلاف، فالهضبة العالية المفترحة في عصر الأيوسين احتلت فقط الجزء الشمالي الشرقي من منطقة الحوض والسلسلة.

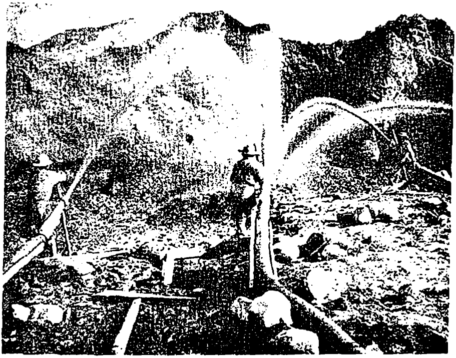
ولم يكن مورس قد اخترع فكرة هضبة التبت الأيوسينة عندما كان يحتسي بضع كؤوس من البيرة في أحد مقاصف نيفادا، فبدايات نظريته تجد أصولها في أطروحته للدكتوراه سنة 1963 حول شرق نيفادا: فقد وضع خرائط لمنطقة قرب مدينة أيلي (وقرب هنا تعني ستين ميلاً عن أيلي نعدم وجود أي مدن أخرى في ما بينها). وتحتوي المنطقة حول أيلي على صدوع جبارة ذات هندسة مسطحات جذب زاوي. ويُشَك اليوم في أن الصدوع المشابهة في جبال الهيمالايا ـ بما فيها الصدع الذي يدعى بـ «الاندفاع الرئيسي المركزي» ـ يمتلك نفس الهندسة. وليس هذا بالشيء الهين، فهذا الصدع يشق الجزء الأعلى من جبل إيفرست.

لقد كان مورس عبر السنين يحتفظ بقائمة ذهنية لأدلة أخرى عن هضبة عصر الأيوسين في شرقي نيفادا.

ـ وصف عالم متحجرات النبات دانيال أكسلرود (Daniel Axelrod) النباتات المتحجرة قرب ألكو في نيفادا بامتلاكها صلة تشابه بالنباتات من جبال الألب.

ـ قد يكون أصل الذهب في رواسب الحصى الغريني الغنية جداً في كاليفورنيا من هضبة عصر الأيوسين في نيفادا، إذ وضح غ. ك. جيلبرت (G. K. Gilbert) في وقت كانت فيه هجمة الذهب في كاليفورنيا لا تزال مستمرة، بأن أغنى مناطق الحصى الغريني كانت قد رسبتها أنهار قبل أن ترتفع السييرا نيفادا كسلسلة جبلية. كما أن

العروق الرئيسية الحاملة للذهب لم تكن المصدر الرئيسي للذهب الغريني، فالرواسب الغنية امتدت إلى أعلى التيار من العروق الرئيسية.



كان الحصى أثناء هجمة الذهب في كاليفورنيا في مجاري الأنهار الحالية قد استنفد أولاً. إثر ذلك حفرت ترسبات أقدم للحصى بفوهات خراطيم عملاقة دعيت الكاشفات. وكانت هذه المناجم الهيدروليكية قد أقفلت سنة 1884 لأن الأنهار امتلأت بالأوحال والغرين وبدات تملأ خليج سان فرانسيسكو (Culver Pictures).

- إن الفعالية البركانية الواسعة التي ظهرت عبر وايومنغ ومونتانا وأيداهو خلال عصر الأيوسين المتأخر تبقى دون تفسير. كذلك فإن الفعالية البركانية الواسعة المرتبطة بهضبة التبت حالياً ليست مفهومة جيداً. وتنتظر المقارنة الهادفة دراسة أعمق.

لا يبرهن أي من هذه الظواهر على وجود هضبة عالية من عصر الأيوسين في الجزء الشرقي من منطقة الحوض والسلسلة. ورغم ذلك، فإذا ما أخذت هذه الظواهر سوية وبغياب أدلة تعاكسها، ستبدو افتراضات مورس أقرب إلى الصحة.

وقد لاحظتُ سنة 2002 شيئاً بسيطاً غريباً قد يكون جزءاً من نفس الأحجية، فقد حاولت مع أحد طلابي السابقين تحديد مصدر بعض بلورات الزيولايت التي كنت قد جمعتها سنة 1958. اعتقدنا أننا وجدنا الموضع، لكننا إضافة إلى الزيولايت وجدنا هيئتين من بلورات الكالسايت الاعتيادية لم تشبه أياً من التي كنا قد رأيناها من قبل. وقد كنا ـ ولا نزال ـ محتارين، لكننا أدركنا أن الصخور التي كنا نأخذ عيناتها كانت قد تكونت في عصر (الأيوسين) وفي الموضع (شمال شرقي منطقة الحوض والسلسلة) الذي افترض إلدردج مورس أعلى هضابه فيها، فالبلورة قد تكون تكونت في الأصل كشيء غير عادي في بحيرة باردة ومقفرة على قمة هضبة، ثم أعادت تبلورها لتصبح كالسايت.

دعنا ننظر في الفرضية القائلة إن بحيرات غرين ريفر كانت تقع في منطقة ذات مناخ شديد الجفاف، وكانت ذات كيمياء ماء غير اعتيادية، وأن ماءها في الطبقات السفلى يخلو من أي مقدار يذكر من الأوكسجين وقد تم فيها حفظ كل شيء تقريباً، من الأشنات أحادية الخمية صعوداً إلى الأفاعي والسلاحف، وتراكم فيها كمٌّ هائل من المادة العضوية. وسوف لا يولِّد النفط إلا حرارة طبيعية يساعدها الدفن العميق، أو حرارة مصطنعة. إذاً، كيف يقارن النفط الذي طبخ من صخور غرين ريفر مع النفط الطبيعي؟

لقد تكوّنت صخور المنشأ لمعظم نفوط العالم في بيئات بحرية، أي أنها صخور منشأ بحرية. ومع ذلك، فلدينا قليل من الأمثلة لنفط خام مصدره صخور غير بحرية. وتميل النفوط غير

البحرية إلى احتواء نسبة عالية من جزيئات الهيدروكاربونات خطيّة السلسلة. أما صخور المنشأ البحرية فتميل إلى توليد نفوط تحتوي على هيدروكاربونات ذات سلاسل متشعبة أو حلقية إضافة إلى السلاسل الخطيّة. وعادة ما تصطف الهيدروكاربونات خطيّة السلسلة بصورة أنيقة في بلورات. ومن أمثلة ذلك الشمع البرافيني المستخدم لختم المربيات المصنوعة بيتياً.

جرت أول زيارة لوفد علمي من الأرض الصينية خلال سنة 1973، وكانت برنستون أحد مواقفهم، فأخذناهم إلى متحفنا الجيولوجي الصغير لنريهم المتحجرات الغريبة من تشكيل غرين ريفر. وقال الجيولوجي الأقدم في البعثة الصينية آن الصين كانت تنتج نفطاً مصدره صخور منشأ غير بحرية. وبدأ هوليس هيدبرغ (Hollis Headberg)، وهو أحد جيولوجي النفط المشهورين في أميركا، متحفزاً جداً وهو يقول: «لقد عرفت ذلك. لقد عرفت ذلك». وكان الصينيون مؤخراً بدأوا يصدرون النفط إلى الهند، إلا أن قصص الأخبار تناقلت أنه عند وصول أول ناقلة بحرية تحمل النفط الصيني إلى الهند، كان النفط قد تحول إلى مادة صلبة لزجة، واستوجب الأمر تفريغ النفط من خزاناته بالمجارف(*). وكان هيدبرغ يعرف أن

(*) يحوي النفط الخام ثلاثة أنواع أساسية، وهي: البارافينية (ذات السلاسل الهيدروكاربونية المستقيمة وبعض السلاسل المفتوحة المتشعبة)، والنفثينية (ذات السلاسل الحلقية المشبعة بالهيدروجين)، والأرروماتية (ذات السلاسل الحلقية غير المشبعة). ويتكلم المؤلف هنا عن النفط من النوع البارافيني. وعادة يكون هذا النفط ذا محتوى عال من الشمع. وبعض أنواع النفط، مثل نفط السودان، يحوي إلى ما يصل 19٪ من المادة الشمعية، لذا يجري تسخين خط الأنابيب الذي ينقل فيه النفط وإلا تحول النفط إلى مادة شبه صلبة غير قابلة للضخ. ويروى أن المدير العام لشركة بي بي التي كانت تملك امتياز حقل (سرير) في ليبيا، ونفطه يحوي بحدود 11٪ من الشمع، قال سنة 1971 عند تأميم الليبيين للامتياز: «إن الليبيين سيكون لديهم أطول شمعة في العالم»، بسبب توقف الضخ لبرهة، لكن الليبيين تغلبوا على ذلك حسبما يبدو.

تبلور الشمع في درجة حرارة الغرفة كان إشارة إلى صخور منشأ غير بحرية، وكان مسروراً لأن حدسه تأكد.

دفن جزء صغير من تشكيل غرين ريفر ومعظمه في ولاية يوتا في النافذة النفطية. ويبدو أن حقل النفط روزفلت وبضع حقول قريبة أخرى تنتج النفط من صخور منشأ غرين ريفر. لقد أنتجت هذه الحقول خمسة ملايين برميل من النفط، ولا تزال فعالة. نعم، فالحقول لديها مشاكل كبرى مع تبلور البرافين من النفط وسده للأنابيب.

وإذا ما ضربنا الطول × العرض × العمق × كمية النفط التي تولدها وحدة الحجوم، فسنحصل على 1500 مليار برميل. والاحتياطي المتبقي في حقول نفط الشرق الأوسط هو بحدود 400 مليار برميل. والرقم الدقيق لما تحصل عليه من سجّيل نفط غرين ريفر يعتمد بالطبع على أوطأ مستوى لمحتوى النفط الذي يُعتقد أنه ذو مردود تجاري مجزٍ. ولا يعتبر أي من هذا السجِّيل الآن تجارياً من أحد النواحي، لذا فإن الإجابة هي صفر.

إن أعلى محتوى قابل للاستخلاص من النفط في غرين ريفر يقارب برميل واحد للطن. وأغنى الوحدات تدعى عامياً «العرق ذي اللون الماهوكوني»، نسبة إلى لون الصخر البني الغامق. لقد أولى عدد من الناس الموهوبين اهتماماً لإمكانيات غرين ريفر. وكانت كلية كولورادو للمعادن قد عقدت اجتماعات سنوية، ونشرت مجلدات سنوية عن الموضوع منذ 1974 ولغاية 1986. كذلك عملت كل من هيئة المسح الجيولوجي للولايات المتحدة، ومكتب المعادن، ووكالة الطاقة الذرية على هذه الإمكانيات. وقامت شركات شل، وإكسون، ويونيون أويل، وسنكلير، وأتلانتك ريشفيلد بإنشاء مصانع ريادية على عرق الماهوكاني الأسطوري.

هل من الممكن أن تكون القضية بهذه الصعوبة؟ من ناحية نجدها بسيطة، فعندما كنت أدرّس الجيولوجيا للمبتدئين قمت باستخراج النفط من سجيل نفط كولورادو خلال تجربة أُجريَتْ على منضدة مختبرية، فقد وضعت ملء ملعقتي طعام من سجّيل النفط مكسرة إلى قطع بحجم رُبع الإنش تقريباً، في أنبوب اختبار وسخنته. ومع بدء نضوج النفط من السجيل أشعلت النهاية المفتوحة لأنبوب الاختبار، فنشر النفط المحترق رائحة كريهة خلال قاعة المحاضرات التي ضمت مائتي طالب. وبرهن النفط المحترق، إضافة إلى إيقاظه الطلبة النائمين، أن السجيل النفطي فيه نفط ذو محتوى كبريتي عالٍ ومن نوعية دون الجيدة.

وصفات طهي السجّيل النفطي

كان السجيل النفطي في عمليات السجّيل لتقنيدية في أوائل القرن العشرين يُحمّل في حاويات كبيرة تدعى الواحدة منها أنبيق (Retort)، وعادة ما كان يتمّ تسخين الحاوية لطرد النفط منها. وتبقى هناك مشكلة واحدة: فالصخر المتبقي بعد التسخين ينتفخ إلى حجم يزيد بنحو 20 بالمائة عن حجم السجّيل الأصلي. وإذا ما حاولت التخلص من السجّيل المستنفد في الحفرة التي عدنته منها فسيتبقى لديك بعض صخر السجّيل المستنفد، فهل تمتلك وادياً لتملأه بما يتبقى من السجّيل المستنفد؟

لقد تم اختبار العديد من التحويرات على طريقة الأنبيق البسيطة، فبعد أن يُطهى النفط تبقى مادة فحمية غنية بالكاربون تغلف الجزء الصخري من السجّيل الأصلي. إن هذه المادة يمكن حرقها لتزويد الأنبيق بالحرارة.

لعلي أتساءل، بطبيعة الحال، إن كان بالإمكان تحويل هذه

المادة إلى غاز اصطناعي على منوال طريقة تكساكو لمعالجة الفحم وأن يستخدم الهيدروجين لتحسين النفط.

وبدلاً عن تعدين سجّيل النفط وتحميصه في أنبيق ورمي الرماد، بذلت جهود لتكسير جزء من السجّيل إلى قطع تحت الأرض وتسخينه موقعياً لاستخلاص النفط، أي الاستخراج في الموقع. وقد أجريت بعض التجارب لكنها لم تزدهر إلى مرحلة الإنتاج التجاري. ولا تزال لجنة المحلفين تتداول قضية الاستخلاص في الموقع الأصلي.

تتضمن الجدوى التجارية في عمليات تكرير النفط العادية، وفي معالجة الرمال القيرية الكندية، وكذلك في إنتاج النفط من السجّيل، نسبة الهيدروجين إلى الكربون؛ فالنفوط الخام من النوعيات الدنيا، ونفوط الرمال القيرية أو السجّيل تمتلك نسبة هيدروجين إلى كاربون أوطأ من المطلوبة في البنزين الذي نرغب فيه. وهناك مصدران بديهيان لغرض تحسين هذه الأنواع من النفط للهيدروجين: الميثان (الغاز الطبيعي) أو الماء.

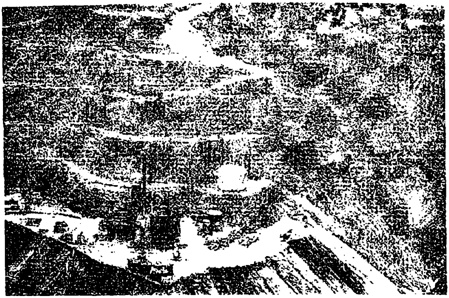
لقد كان الغاز الطبيعي حتى زمن قريب المصدر الأرخص للهيدروجين. ويستخدم الميثان حالياً في تحسين نوعية النفط المستخلص من الرمال القيرية في كندا، لكن أسعار الغاز الطبيعي على أي حال بدأت ترتفع بصورة سريعة. وكما بينا في الفصل الرابع أيضاً فإن مواردنا الفائضة من الغاز الطبيعي تستخدم الآن لمصانع توليد الكهرباء الجديدة.

والماء رخيص لكنه ليس متيسراً بتلك الدرجة، فنهر غرين (وهنا نعني النهر وليس السجّيل النفطي) يصب في نهر كولورادو، وتحتاج سان دييغو ولاس فيغاس إلى كميات كبيرة من الماء

الإضافي، لكن مياه نهر كولورادو مقسمة بموجب معاهدة مع دولة المكسيك. ومن المؤكد أن استخدام جزء رئيسي من مياه هذا النهر لمعالجة السجّيل النفطي سيولد مشاكل قانونية. ونتيجة ذلك قد تكون كلفة أجور المقاضاة أكبر من كلفة أنابيق معالجة النفط(*). وقد جرت محاولة لاستخلاص النفط بواسطة البخار(6). وكانت النتائج مشجعة، لكن لم يبرز أي نجاح تجاري. وهناك فقرة جديدة تلوح في الأفق: فصل الأوكسجين من الهواء أصبح أقل كلفة. وأحد أسرار طريقة تكساكو لصنع الهيدروجين من الفحم والماء هي باستخدام الأوكسجين النقي بدل الماء. وثلاثة أرباع الهواء نايتروجين، كما أن هناك خسارة متعلقة بتسخين وتبريد النايتروجين، كما أن أكاسيد النايتروجين نواتج عرضية غير مرغوب بها للطريقة.

(*) إن إنتاج مليون برميل من النفط يومياً يعني أقل من اثني عشر برميلاً في الثانية، وهذا يساوي نحو 1,6 متر مكعب في الثانية، ولن تكون كمية الماء المطلوبة لتوليد الهيدروجين لتسخين هذه الكمية من النفط لتتجاوز 2 متر مكعب في الثانية من مياه نهر كولورادو البالغ معدلها 620 متر مكعب، ولا أعرف إن كان ذلك سيولد مشاكل قانونية.

(6) يشير براد ليملي إلى طريقة جيدة حصلت على براءة اختراع لاستخدام الماء الساخن في وعاء مضغوط لاستخلاص الدهون من أي حاجة، بدءاً بنفايات الطعام، مثل أحشاء دجاج التركي، إلى فحم الأنثراسايت. ورغم عدم كوني محامياً متخصصاً ببراءات الاختراع إلا أنني أود إلقاء نظرة مدققة على الطرق التي نشرت عن معالجة السجّيل النفطي. انظر: Brad Lemley, «Anything Into Oil,» *Discover* (24 May 2003), pp. 50-57.



مصنع ريادي لاستخراج النفط من السجّيل النفطي يقف مهجوراً قرب إيغل (Eagle) في كولورادو (Colorado). وقد التقطت هذه الصورة سنة 2003 عندما كان المصنع مقفلاً منذ عشرين سنة. والمصاطب وراء المصنع حدثت نتيجة تعدين السجّيل النفطي (دايفيد زالوبوسكي (David Zalubowski) (Associated Press).

هل هناك أي شيء آخر يمكن عمله لاستخراج النفط من السجّيل في أميركا؟ إن زيادة أسعار النفط قد لا تكون كافية. وإذا ما طلب مني ذلك فأدناه ما قد أجربه:

ـ إننا بحاجة إلى منتوج عرضي أو منتوج مواز يصنع من السجّيل المستنفد، أو على الأقل من الجزء الذي لا محل له في الأرض. وقد نظر الناس في الزجاج والإسمنت والألواح لصنع الجدران. ولعل اختيار شيء ما من هذه القائمة أو إيجاد منتوج عرضي آخر سيكون عوناً كبيراً.

ـ يتخلّل أحواض كاربونات الصوديوم في وايومنغ في بعض الأوقات طبقات من السجّيل النفطي جيد النوعية، فهل من الممكن تعدين مزيج من كاربونات الصوديوم التي ليست ذات جدوى اقتصادية كبيرة، والسجّيل النفطي الذي ليس بذي جدوى اقتصادية

كبيرة أيضاً، وإيجاد منتوج عرضي بارع آخر والحصول على ربح؟

ـ طور نموذج حاسوبي ذا طريقة معالجة طبيعية عامة بالأنبيق. وهذا لا يعني أن الحاسوب مرشد سحري، لكن كتابة البرنامج سيجعلك تفكر في كل قضية ذات علاقة. وما أن يصبح البرنامج مكتملاً إلى درجة مقبولة يمكنك أن تطرح عليه أسئلة من نوع: ماذا إن كانت الكلفة أقل بكثير من كلفة بناء أنابيق معالجة والتخلي عنها بعدئذٍ؟

وإليك نموذج لبرنامج حاسوبي ناجح: كانت شركة كينيكوت (Kennecott) للنحاس تعاني من مشاكل في إيصال عملياتها للأكداس الكبيرة ـ الترشيح في استخلاص النحاس إلى حدّها الأمثل. وقام لاري كاثليس (Larry Cathles) الذي كان ضمن عمليات البحوث لدى كينيكوت، وهو الآن في كورنيل، بوضع روتين حاسوبي لنمذجة تدفق الهواء والماء والحرارة وعمليات الباكتيريا الكيميائية ضمن الكدس. وأصبحت العملية أكثر فعالية، ولم يكن ذلك بسبب كون برنامج الحاسوب ذا دقة خارقة للطبيعة، بل لأن المحاكاة بواسطة الحاسوب أخبرتك بما يجب تجنبه. وتوصياتي هي أن نبدأ بتوظيف خدمات لاري كاثليس وأحد الخبراء من إيستونيا.

الفصل الثامن

اليورانيوم

كان عنوان ورقة م. كينغ هابرت الشهيرة لسنة 1956، التي توقعت ذروة الإنتاج النفطي في الولايات المتحدة، **الطاقة النووية وأنواع الوقود الأحفوري** (*Nuclear Energy and the Fossil Fuels*)، وكانت الطاقة النووية ـ من منظوره ـ البديلَ طويل الأمد للنفط والغاز الطبيعي. وحتى لو كانت أفكار هبرت حول تطوّر النفط صحيحة تماماً، فليس هناك من ضمانة مطلقة، فما من ضمان أن أفكاره عن الطاقة النووية صحيحة، لكن رسالته على أي حال تستحق تقييماً دقيقاً. إن الطاقة النووية في الولايات المتحدة اليوم شيء غير مرغوب بصورة هائلة، فحادثة الانصهار في ثري مايل آيلاند (Three Mile Island) سنة 1979، والانفجار الذي حدث في تشرنوبيل سنة 1986، عززا الخوف الكامن من الإشعاع النووي. ولم تجرِ إضافة مفاعلات نووية جديدة للطاقة في الولايات المتحدة منذ سنة 1973.

وتوليد الكهرباء من اليورانيوم لا يضيف أي ثاني أوكسيد الكربون إلى الجو. وفيما إذا قبلت وسائل توليد الطاقة النووية، فإن لدينا اليورانيوم، كما أن لدينا حالياً الآن خبرة هندسية كاملة حوله.

ومن المفضل كموقف في العلاقات العامة أن نبحث محطات

القوة النووية من دون أن نثير موضوع الأسلحة النووية المزعج. ومع ذلك، ولكي نحصل على منظور شامل وواضح، علينا (مع الأسف) أن نبحث في القنابل كما نبحث في توليد الكهرباء، فتاريخ الاثنين وتكنولوجيا الاثنين والحاجة للتحكم فيهما مترابطين بصورة وثيقة.

إن كافة التفاعلات، كيميائية أو نووية، يمكن أن تطلق طاقة مفيدة في ما إذا كانت المواد في البدء ذات مستوى طاقة أعلى من المنتوج النهائي. إن خطاً بيانياً للطاقة النووية مقابل حجم النواة له شكل يشبه قعر حوض سباحة عادي: فهو شديد الانحدار في إحدى نهايتيه تزداد ضحالته بصورة بطيئة نحو النهاية الأخرى. فالنوى الخفيفة، مثل الهيدروجين والهيليوم، لديها مستويات طاقة نووية عالية. أما أوطأ المستويات فهي للنيكل والحديد. وتزداد الطاقة ببطء في العناصر الثقيلة، انتهاء باليورانيوم. ويمكن الحصول على الطاقة النووية إما بفلق أكبر النوى إلى قطع أصغر (الانشطار النووي)، أو بجمع نواتين صغيرتين في نواة واحدة أكبر (الاندماج النووي).

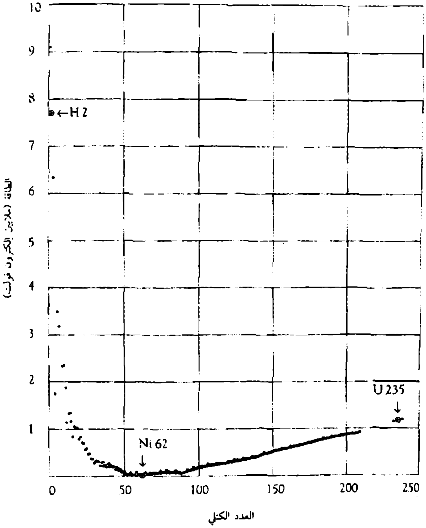
كان الانشطار النووي قد طوّر أولاً. وقد أظهر العمل المختبري في السنين التي سبقت الحرب العالمية الثانية مباشرة أن نوى اليورانيوم بعد امتصاصها لنيوترون واحد ستنفلق إلى نواتين من نفس الحجم تقريباً. ورغم أن طاقة الجزأين كانت أكبر من طاقة ذرة الحديد، إلا أنهما كانا أوطأ من اليورانيوم على منحنى الطاقة الرابطة. سيتم بذلك إطلاق طاقة، وكميات كبرى منها. لقد أظهرت التجارب في نهاية سنة 1938 وبدايات 1939، أن النيوترونات تُطلق أثناء الانشطار أيضاً، وأن العملية يمكن أن تديم نفسها بشكل تفاعل متسلسل. ويحتوي اليورانيوم الطبيعي على نوعين من النوى: U_{235} أي اليوارنيوم 235 (ويشكل أقل من واحد بالمائة)، وU_{238} أي اليورانيوم 238 (ويشكل التسعة والتسعين بالمائة

الباقية). وقد أظهر نيلز بوهر[1] (Niels Bohr) وجون ويلر (John Wheeler) سنة 1939، أن اليورانيوم U_{235} النادر هو الذي كان ينشطر، وكنت قد سمعت ويلر يلقي محاضرة عن هذا الاكتشاف، وكان الأمر حسب مقولته سهلاً، فالنوى ذات العدد الزوجي من البروتونات والنيوترونات أوطأ قليلاً على الخط البياني للطاقة الرابطة، أما الأرقام الفردية فهي أعلى. وعندما تأخذ ذرة U_{238} نيوتروناً تصبح لحظوياً U_{239}، وهذا عدد فردي. ونقدر أن نفكر بها كأنها تتشبع بالطاقة. من ناحية أخرى فإن إضافة نيوترون إلى U_{235} يجعله ذا عدد ذري زوجي. وتتمثل الطاقة الفائضة كذبذبات لنواة اليورانيوم التي سرعان ما تنشطر شطرين.

وعندما بدأت ملامح الحرب العالمية الثانية تلوح في الأفق، قام ليو سيلارد (Leo Szilard) ويوجين فيغنر (Eugene Wigner) بحث إينشتاين على تحرير رسالته الشهيرة سنة 1939، التي أخبر فيها الرئيس روزفلت أن الأسلحة النووية أصبحت ممكنة، وحذره فيها من أن أي أمة تطورها أولاً ستمتلك أفضلية عسكرية هائلة. وبرز طريقان ممكنان إلى القنبلة الذرية: فصل U_{235} من اليورانيوم الطبيعي، أو توليد عنصر كيميائي جديد هو البلوتونيوم في مفاعل نووي. وكان كلا الطريقين فعالاً: فقد دمرت قنبلة مصنوعة من اليورانيوم هيروشيما فيما استخدمت قنبلة من البلوتونيوم لدك مدينة ناكازاكي. ويجب أن نتذكر أن أي ضمان لفعالية أي من القنبلتين لم يكن موجوداً عند بنائهما، وكان بإمكان أي منهما أن يتحول إلى إخفاق إذا ما استهل نيوترون سائب من داخل أو خارج القنبلة التفاعل النووي في منتصف

(1) انظر: Niels Bohr and John Wheeler, «The Mechanism of Nuclear Fission,» *Physical Review*, vol. 56 (1939), pp. 426-450.

التسلسل النهائي للانفجار. لقد تمّ، تحت ضغط ظروف الحرب، تطوير كلا التصميمين.



الفيزيائيون هذا (منحنى طاقة التآصر)، - وهي الطاقة في نواة الذرة مقسومة على عدد البروتونات والنيوترونات. وأكثر النوى استقراراً هي النيكل 62، ويظهر داخل دائرة في الأسفل. وتطلق العناصر الثقيلة، مثل اليورانيوم 253 (في الدائرة إلى اليمين) والعناصر الخفيفة مثل الديوتيريوم (هيدروجين 2، في الدائرة إلى الأعلى يساراً) كميات هائلة من الطاقة فيما إذا أعيد ترتيبها كنوى أقرب إلى النيكل 62. ويرسم هذا الشكل تقليدياً مع المقياس العمودي مقلوباً، لكني أفضل مفهوم إطلاق الطاقة عندما تنحدر الأشياء إلى أسفل.

تطلبت طريقة استخدام البلوتونيوم بناء مفاعلات نووية. كان أول مفاعل قد بني تحت ملعب كرة القدم لجامعة شيكاغو، وأظهر أن الإطلاق المسيطر عليه للطاقة النووية ممكن. وبعد أول تشغيل تجريبي ناجح، أخرج يوجين ويغنر قنينة نبيد من نوع كيانتي كان قد اشتراها من مخزن خمور في برنستون[2]. وكان فخوراً من بصيرته، بحيث خزن النبيذ الأوروبي قبل بدء الحرب. كان تصميم المفاعل النووي كما ادعى أسهل بالمقارنة. وكان ويغنر الذي درس الهندسة الكيميائية قبل أن يحترف الفيزياء قد صمم المفاعلات الكبيرة لإنتاج البلوتونيوم في هانفورد بولاية واشنطن. أما مفاعلاتنا الحالية، فهي من تصميم مختلف تماماً، في حين أن كارثة تشرنوبيل حدثت في مفاعل ذي تصميم شبيه بمفاعلات هانفورد.

لقد سار عمل مفاعلات هانفورد، نتيجة لعبقرية ويغنر، من دون أي حادثة جسيمة تذكر، حتى إغلاق آخر واحد منها سنة 1986، وحتى عندما كانت الأسلحة النووية تصمم في لوس ألاموس، كان إدوارد تيلر (Edward Teller) ينظر إلى الجهة الثانية من منحنى الطاقة الرابطة، فالانحدار الشديد في النهاية الخفيفة للمنحنى أظهرت إمكانية إطلاق مقادير أكبر من الطاقة. وكانت تلك الإمكانية تدعى بالقنبلة الهيدروجينية، أو «الفائقة». وكان كل من تيلر في الولايات المتحدة وأندري ساخاروف (Andrei Sakharov) في الاتحاد السوفياتي خلال سنة 1950 يفكران في عدد من التصاميم، التي لم تكن ناجحة. ورغم أن التفاصيل لا تزال سرية جداً، إلا أنه تبين أن عالم الرياضيات ستانيسلاو أولام (Stanislaw Ulam) هو

---

(2) انظر: Engene Wigner, *The Recollections of Eugene P. Wigner* (New York: Plenum, 1992), pp. 6-8.

الذي اقترح على تيلر إمكانية تركيز فوتونات الأشعة السينية الناتجة من قنبلة انشطارية متفجرة، لكي تسخن وتكبس كتلة العنصر الخفيفة[3]. وتؤدي الحرارة والكثافة بذرات الهيدروجين إلى تقاربها بدرجة كافية لتندمج. بعد ذلك بقليل. كان كل من الأميركان والروس يجريان اختبارات في الجو مخيفة بكل ما في الكلمة من معنى لقنابل هيدروجينية، قوة واحدتها عدة آلاف من الأطنان من المتفجرات التقليدية. ولم تكن المواد المستخدمة في الحقيقة من نوع الهيدروجين المتوفر في الحدائق، إذ إن نوى الهيدروجين ذوات النيوترونات الزائدة كانت هي المزود للطاقة، مثلما كانت العناصر الخفيفة كالليثيوم.

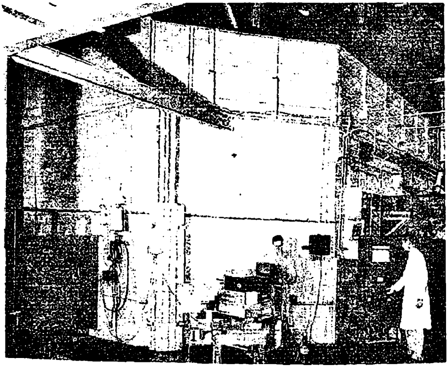
وإذا ما كان الاندماج النووي يجعل القنبلة الهيدروجينية ممكنة، فلماذا لا تستطيع بناء مفاعل يعمل باندماج الوقود الهيدروجيني؟

خطر ببال ليمان سبتزر (Lyman Spitzer) سنة 1951، حينما كان في منتصف طريق الصعود في مصعد التزلج في منطقة أسبن، فكرة لمفاعل يعمل بالاندماج، (واشتكت عائلته بعد ذلك من أن تلك الإجازة كانت أسوأ إجازة قضوها، وكانت الفكرة قد خطرت لسبتزر في أول أيام إجازته وترجل من المصعد في منتصف الطريق وتزلج إلى الأسفل وقضى بقية أيام إجازته داخل غرفة الفندق يكتب). ولأن سبتزر كان عالم فلك، فقد كان متفهماً بصورة جيدة لاكتشاف هنز بيته (Hans Bethe) حول الاندماج النووي الذي يوفر القوة للشمس. وفكر سبتزر باستخدام مجالات مغناطيسية لتقييد غاز مسخن إلى أكثر من مليار درجة حرارية. وقادت بصيرة سبتزر إلى بحث تجريبي

---

(3) انظر: Richard Rhodes, *Dark Sun: The Making of the Hydrogen Bomb* (New York: Simon and Schuster, 1995), pp. 462-463.

لتطوير مفاعل قوة مسيطر عليه يعمل بالاندماج وهو جهد استمر لمدة خمسين عاماً. واستهلكت مفاعلات الاندماج التجريبية خلال السنين الأولى قدراً كبيراً من القوة، وكانت المكافأة الوحيدة عدداً قليلاً من النيوترونات التي ظهرت لتربنا أن شيئاً ما كان يحدث. وعندما توسعت التجارب أصبح مجهز القوة لها أكبر من بيتي ذي الطوابق الثلاث. ورغم أن كمية الطاقة المنتجة ازدادت، إلا أن الطاقة المنتجة كنت أقل من تلك المستهلكة. وهناك الآن مشروع دولي يدعى (ITER) يخطط للوصول أقرب ما يمكن بالطاقة المنتجة لتلك المستخدمة، لكن الأمر يستلزم عشرين سنة أخرى قبل أن نتوقع مفاعلاً اندماجياً تجارياً.



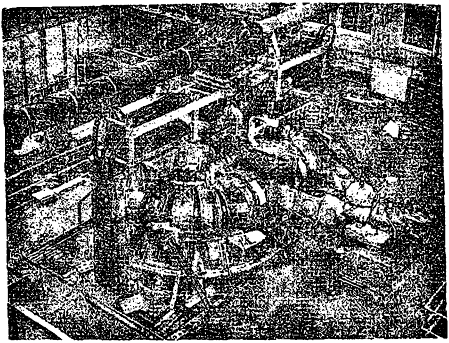
بني أول مفاعل نووي في العالم سنة 1942 في جامعة شيكاغو. وتكون المفاعل من قضبان من اليورانيوم غير المخصب موزعة بين كتل من الكاربون عالي ـ النقاء (غرافيت). (بيتمان (Bettman)/ CORBIS).

إن سلاح الانشطار النووي الذي يدعى رسمياً بالقنبلة الذرية له قلب مكوّن من كتلة من البلوتونيوم أو من اليورانيوم 235 شبه النقي. ولكي تنفجر القنبلة يجب أن تكون كتلة المادة الانشطارية كبيرة بما فيه الكفاية وذات كثافة كافية أيضاً، بحيث أن النيوترونات المتحررة من الانشطار الشروعي ستُقتنص من قبل ذرات البلوتونيوم أو اليورانيوم الأخرى التي ستنشطر بدورها. وفي كافة الأسلحة عدا البدائية جداً منها هناك قشرة من الكيميائيات التقليدية شديدة الانفجار تستخدم لضغط المادة الانشطارية الجهنمية من حجم مستقرّ إلى كثافة تسمح بحدوث التكاثر التسلسلي للنيوترونات. ويتضمن جزء من التصميم الهندسي غياب النيوترونات الشاردة حتى تصل المادة الانشطارية الحد الأعلى لكثافتها ومن ثم تزود بعدد قليل من النيوترونات لبدء التفاعل التسلسلي.



بدأ ليمان سبترز (Lyman Spitzer) الابن برنامجاً سنة 1951 لتوليد الطاقة بواسطة دمج ذرات الهيدروجين. وكان قد كتب سنة 1946 وقبل وجود أقمار اصطناعية عن منافع وضع تلسكوب في الفضاء، وقد كان أبو تلسكوب هَبْل الفضائي. وكانت هذه الصورة قد التقطت سنة 1989 عندما كان سبيزر يستلم جائزة أخرى استحقها بجدارة.

(أرشيف جامعة برنستون (Princeton University Archives))



توسعت الخطى التجريبية الهادفة إلى مفاعلات اندماجية مع مرور الزمن. وكانت أولى التجارب في الخمسينات عدد منضدية كبيرة. وهذه ماكنة تعود لسنة 1956 في مختبرات فيزياء البلازما في برنستون. ويجري حصر الغاز الساخن في أنبوب بيضوي أفقي المستوى قطره نحو ست إنشات في مركز الملفات الشبيهة بالبكرة. وتحتوي المكائن التجريبية اليوم على أنابيب يتجاوز قطرها ستة أقدام ويحتل مفاعل تجريبي بناية خاصة به (أرشيف جامعة برنستون).

وكما ذكرنا سابقاً فإن السلاح الاندماجي، أو القنبلة الهيدروجينية يحوي قنبلة انشطارية من أصغر الأحجام تسمى الأولية. وعند انفجار «الأولية»، ينطلق منها مزيج فوضوي من متفجرات كيميائية محترقة، ونواتج الانشطار النووي، ونيوترونات، وأشعة سينية، ومواد صلبة متبخرة. والأشعة السينية من بين كل هذه الفوضى هي الوحيدة التي تتحرك بسرعة الضوء. أما ما تبقى فيتحرك بسرعة أقل. ويَدَع اختراع أولام ـ تيلر الأشعة السينية تنطلق قبل بقية الحطام الملتهب. وتركز هذه الأشعة لكي تقوم بكبس هدف ثانوي يحتوي على ذرات يمكن لنواها أن تندمج وتحرر طاقة.

وهناك استنتاجات مهمة من هذه القصة الطويلة والمخيفة حول القنابل والمفاعلات، فكل الأسلحة النووية الحديثة هي قنابل اندماجية ـ انشطارية هجينة، فقنبلة اليورانيوم أو البلوتونيوم الانشطارية يوجد فيها بعض التريتيوم (وهو هيدروجين يوجد في نوى ذراته نيوترونان) المضاف لتزويد نيوترونات إضافية بهدف توكيد مساهمة كل اليورانيوم (أو البلوتونيوم) في التفاعل. أما في القنبلة المكملة، أي الجزء الاندماجي من القنبلة الهيدروجينية، فإن رقاقة من اليورانيوم توضع فيها، رغم أن القنبلة فعالة من دون اليورانيوم في هذا الجزء المكمّل. ويخبرونني بأن اليورانيوم ببساطة يولد انفجاراً أكثر هولاً مقارناً بكلفته.

وهناك ما يوازي ذلك في عالم مفاعلات القوة (Power Reactors)، فالمفاعلات الانشطارية عادة ما تكون محرومة من النيوترونات، أما المفاعلات الاندماجية، فالنيوترونات تتدفق حتى من آذانها. وقد كنت أشتكي منذ عشرين عاماً قائلاً إن الطريقة الوحيدة التي يمكن لمفاعل اندماجي أن يكون شيئاً معقولاً هي أن يؤلف جزء من هجين اندماجي ـ انشطاري. لكن علماء الاندماج لا يريدون مع ذلك أن يسمعوا بالهجائن، فمفاعلاتهم الاندماجية البحتة «نظيفة»، من حيث إنها لا تولد نواتج احتراق انشطارية مشعة طويلة العمر. وهم لا يريدون لمفاعلاتهم الجميلة أن تتسخ باليورانيوم القذر.

المفاعِلات الانشطارية

يقتصر عمل الجزء الانشطاري من المفاعل النووي ببساطة على توليد الحرارة. وإذا أردت أن توفر الدفع لغواصة نووية، أو أن تولد الكهرباء، فستستخدم تلك الحرارة لأداء العمل، وأي منظومة تحول الحرارة إلى شغل مفيد تدعى بالآلة الحرارية.

وقد نشر سادي كارنو (Sadi Carnot) سنة 1824 نتيجة مدهشة مفادها: إن الحد الأعلى للكفاءة الممكنة لآلة حرارية يعتمد فقط على درجة حرارة المصدر (hot) ودرجة الحرارة التي تغادر المنظومة (cold) أي أن

$$\frac{T_{hot} - T_{cold}}{T_{hot}} = \text{(Efficiency) الكفاءة}$$

حيث إن T_{hot} هي درجة الحرارة الساخنة، و T_{cold} هي درجة الحرارة الباردة مقاستان على المقياس المطلق[4].

ولا تعتمد نتائج كارنو على المواد داخل الآلة الحرارية أو الأنابيب المتصلة بها. وبالطبع، فإن كافة المكائن الفعلية يتخلّلها احتكاك ومصادر أخرى تنتقص من الكفاءة. لكن أي ماكنة ليس بإمكانها أن تكون أكثر كفاءة من ماكنة كارنو المثالية. (وقد أدهشني وسرني أن أكتشف شوارع باسم كارنو في عدد من البلدات الفرنسية، وتبين وجود عائلة مشهورة تدعى كارنو ـ وأن أحد أفرادها كان رئيس جمهورية فرنسا ـ وليس من السهل معرفة من الذي كان يشرّف بهذه التسمية)، ونيست كل المنظومات التي تؤدي شغلاً مفيداً تعدّ الآن حرارية، فخلايا الوقود، وعضلات جسمك، والمحركات الكهربائية ليست آلات حرارية، ولا يحددها تعريف كارنو للكفاءة.

من ناحية أخرى، تحتاج محطات التوليد الكهربائي إضافة إلى حرارة من مصدر سخن إلى موضع بارد للتخلص من الحرارة الفائضة. وتقول معادلة كارنو إنه كل ما كان ذلك الموضع أبرد كان

---

(4) يعطينا كتاب: Gilbert N. Lewis and Merle Randall, *Thermodynamics*, 2d ed. (New York: McGraw-Hill, 1961), pp. 94-98, نقاشاً حديثاً عن نتائج كارنو (Carnot).

ذلك أفضل. ويمكن في الأماكن البادرة استخدام نموذج مكبر لمشع (radiator) السيارة لإطلاق الحرارة مباشرة إلى الجو. أما في الأماكن الدافئة، فيمكن رش الماء على المبادلات الحرارية وتبديد الحرارة الفائضة في تبخير الماء. والماء في العديد من الأماكن بالطبع مخصص قبل ذلك لاستخدامات أخرى، ولا يمكن استخدام المبردات التبخيرية.

والحل الآخر هو أن يكون موضع محطة توليد الكهرباء مجاوراً لنهر، وأن يستخدم ماء النهر للتخلص من الحرارة الفائضة. وسيكون مقدار الماء الخارج من المحطة بقدر الماء الذي يدخل فيها لامتصاص هذه الحرارة المطروحة. صحيح؟ لا خطأ!

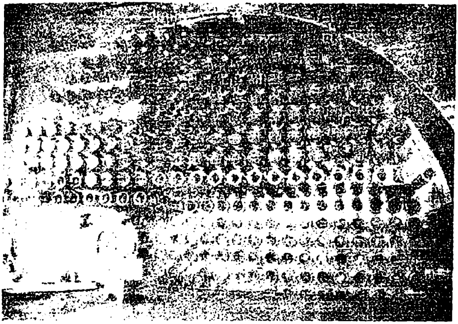
فجزء من النهر المسخن يتبخر لتبريد النهر إلى درجة حرارته الأصلية، وسيكون الماء المفقود بنفس مقدار الماء المفقود من التبخر المباشر داخل المحطة. أما وضع محطة الكهرباء على ساحل البحر، فقد يولد بعض المشاكل البايولوجية لكنه لا يستهلك من مصادر المياه العذبة.

وعندما كانت محطات القوة الكهربائية النووية تصمم في الخمسينيات، توقع بعض المهندسين النوويين أن الكهرباء ستصبح «أرخص من أن تقاس»، وكان اليورانيوم مبتذلاً ولم يكن غالي الثمن، ولم تمثل كلفته إلا جزءاً بسيطاً من الكلفة الكلية للكهرباء المولد. وتمثلت الكلفة الرئيسية في الرأسمال المطلوب لبناء المفاعل. وبسبب هذه الكلف الرأسمالية لم تظهر الكهرباء الرخيصة أبداً. والكهرباء المولدة في المحطات النووية مصدر لأكثر من 50 بالمائة من الكهرباء التي أدفع كلفتها في نيوجرسي، حيث يبلغ سعر الكيلوواط/ساعة 11 سنتاً. والمشوق أن الاتصالات أصبحت أرخص من أن تقاس، ففي الخمسينيات كانت البرقيات إلى الخارج تكلف

20 سنتاً عن كل كلمة. أما اليوم، فأستطيع أن أرسل رسائل إلكترونية طويلة إلى طوكيو وتبقى فاتورتي الشهرية مبلغاً مقطوعاً. وقد توقفت كلية دارتماوث عن استيفاء أجور من طلابها عن المكالمات بعيدة المدى.

وهناك عدد من التصاميم الممكنة للمفاعلات الانشطارية. وقد تم التفكير في نحو عشرين نوعاً أساسياً، كما تم إنشاء مفاعل واحد تجريبي من كل نوع على الأقل. وليس هناك داع لوضع قائمة بها هنا، رغم أننا يجب أن نلحظ أن التباين يتضمن ثلاثة عوامل: نوع الوقود، وشيئاً ما لتخفيف سرعة النيوترونات (الملطِّف The Moderator)، والوسائل المستخدمة لاستخلاص الحرارة من المفاعل (المبرِّد The Cooler). وأبسط انواع الوقود هو اليورانيوم الطبيعي. لقد أُنشئ أول مفاعل تجريبي تحت إستاد كرة القدم لجامعة شيكاغو. ويستخدم هذا المفاعل، بالإضافة إلى مفاعلات إنتاج البلوتونيوم في هانفورد أثناء الحرب العالمية الثانية، وكذلك المفاعل المنكوب في تشرنوبيل، اليورانيوم الطبيعي، يفصله عن بعضه البعض كتل من الكاربون تعمل كملطف. والتصميم الوحيد الحديث الناجح الذي يستخدم اليورانيوم الطبيعي هو التصميم الكندي الذي يستخدم الماء الثقيل (أوكسيد الديوتيريوم)(*) كملطِّف. وهذا التصميم الذي يعرف باسم CANDU قد استخدم في سبعة عشر مفاعلاً لتوليد الكهرباء في كندا، كما بيعت عشرة مفاعلات منه في ما وراء البحار، وقد قامت شركة أتوميك إينرجي الكندية، في تحرك غريب، بالترويج لنوع جديد من المفاعلات المدعو (ACR - 700) والذي يتخلى عن تصميم CANDU.

(*) الديوتيريوم هو نظير الهيدروجين الذي يوجد في نواته نيوترون واحد مع البروتون. والماء الثقيل هو الماء الذي تكون ذرات الهيدروجين فيه من نظير الديوتيريوم.



أتاح استخدام الماء الثقيل (أوكسيد الديوتيريوم) في مفاعلات الانشطار النووي الكندية نوع (CANDU) استخدام يورانيوم طبيعي غير مخصب. وكان الفائدة الثانية قابلية استبدال قضبان الوقود حينما يكون المفاعل عاملاً. وتدعى هذه المفاعلات بكوابيس عمال الأنابيب، لأن الماء الثقيل يكلف 400 دولار للباوند الواحد، لذا فإن أقل تسرب يكلف مبلغاً كبيراً. (كاندو أوتمار بيرواغن (Candu-Ottmar Bierwagen)/ سبكتروم ستوك (Spectrum Stock)).

والخطوة التالية صعوداً (أو هبوطاً إذا ما رغبت) تتضمن مفاعلات غير فعّالة إذا ما تم تزويدها باليورانيوم الطبيعي. والمكون الفعال في اليورانيوم هو النظير U_{235} الذي يوجد بنسبة 0,7 من الواحد بالمائة. وتخصيب محتوى U_{235} إلى 3 بالمائة يسهل استخدام الماء الاعتيادي كملطّف ومبرد. وفصل النظير U_{235} عن U_{238} عملية مضنية ومكلفة. تحت ضغط ظروف الحرب، قام أولئك الناس الرائعون الذي جاؤوا لك بهيروشيما، بتطوير الانتشار الغازي لإجراء الفصل. ونابذات الغاز المركزية (أو الطاردة عن المركز) (Gas centrifuges) اليوم أرخص وتستهلك طاقة أقل. والمفاعلات التجارية

التي تولد الكهرباء في الولايات المتحدة تقع ضمن تصميمين فيهما اختلاف بسيط. فثلث المفاعلات تقريباً تستخدم حرارة من قلب المفاعل الحاوي لليورانيوم لغلي الماء ويمرر البخار الناتج خلال التوربين لتوليد القوة الكهربائية، أما ثلثي المفاعلات الباقية، فتسخن الماء الضغوط الذي لا يسمح له بالتحول إلى بخار، ويحول الماء المضغوط غير المتبخر ماء آخر غير مضغوط إلى بخار والذي بدوره يولد الكهرباء. وبعض خيارات التصميم هي نتيجة لبعض أحداث التاريخ الغريبة، فمفاعل الماء المضغوط طور في البدء للغواصات النووية تحت قيادة الأدميرال هيمان ريكوفر. وكانت أولى مفاعلات القوة الكهربائية الأميركية قد تبنت تصاميم مفاعلات الغواصات.

ومصدر الكفاءة هو تشغيل قلب المفاعل بأعلى درجة حرارة تسمح بها سلامة التشغيل والقيام بتكثيف البخار الناتج إلى ماء في أوطأ درجة حرارة ممكنة. ولا تزال معادلة كارنو تطبق هنا. وتصاميم مفعلات تعمل في درجت حرارية عالية جداً وتبرد بمعادن منصهرة هي على لوحات التصميم الآن.

وبعد انصهار قلب أحد مفاعلات توليد الكهرباء في ثري مايل آيلاند (Three Mile Island) سنة 1979، توقف بناء محطات قوة كهربائية جديدة في الولايات المتحدة وأُلغيت الطلبيات التي كانت متفق عليها. وكان آخر طلب لمحطة قوة نووية تم بناؤها فعلاً وشغلت قد وضع سنة 1973.

وقد بنيت إضافة إلى مفاعلات توليد القوة الكهربائية تشكيلة من مفاعلات لأغراض خاصة. وكان أحد التصاميم المشوقة على وجه التخصيص بمثله خط من تصاميم البحوث المدعو TRIGA، بنتة شركة جنرال ديناميكس. وسلامة هذا الصنف من المفاعلات لم تكن

تضمنه ضد الأغبياء وحسب بل ضد العبث من قبل الأساتذة أيضاً[5].

ولم تكن سلامة المفاعل خاصية لنظام التحكم الإلكتروني فقط، بل هي خاصية لفيزيائه الداخلية أيضاً، فإذا ما أنتج المفاعل طاقة بسرعة كبيرة خفف التمدد الحراري للماء من التفاعل النووي. وقد جرى بناء العشرات من هذا النوع من المفاعلات حول العالم ولم تحدث حادثة نووية في أي منها.

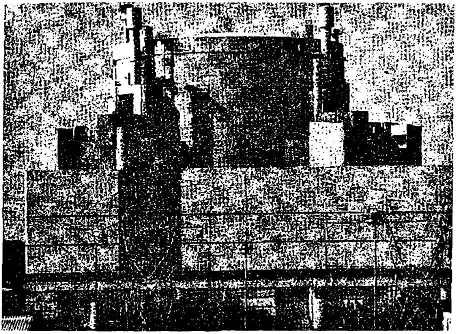
كان الغرض من مفاعلات الحرب العالمية الثانية في هانفورد هو اقتناص النيوترونات من انشطار U_{235} الأكثر تواجداً للحصول على البلوتونيوم، وهو عنصر مصطنع. وكانت القنابل التي فُجرت في الفحص فوق ألاموغوردو (Alamogordo) وفوق ناكازاكي مصنوعة من البلوتونيوم. وكان الفصل الكيميائي للبلوتونيوم المنتج في المفاعل من نواتج الاحتراق الأخرى عملية مضنية أخرى. كانت قضبان الوقود عند أخذها من المفاعل شديدة الفعالية الإشعاعية وكان تعرض الإنسان لها لمدة دقيقة كافياً لموته. وكانت المناولة الكيميائية بمجملها تتمّ بواسطة التحكم عن بعد. ولم تكن هناك طريقة لإصلاح أي شيء إذا ما عطل. وكانت الخطوة الكيميائية الذكية تعني إيجاد الجزيئة التي تتآصر انتقائياً مع البلوتونيوم وتضيف إلى الجزيئة ذَنَباً هايدروكاربونياً بحيث تذوب بالتناوب بالماء وبالزيت. وأجري هذا الفصل الكيميائي في سلسلة من الخزانات المعزولة بالتدريج، والمدعوة بالمازجات ـ المرسبات (mixer - settler)، وكان كل مازج له عنصر مزج هو الجزء الوحيد المتحرك داخله.

لكن وسائل فصل البلوتونيوم متوفرة تجارياً اليوم رغم أنها

---

(5) انظر: George Dyson, *Project Orion: The True Story of the Atomic Spaceship* (New York: Henry Holt, 2002), pp. 42-45.

موضع جدل عنيف. والبلوتونيوم المسترجع من اليورانيوم المستخدم هو وقود رخيص الثمن لتوليد كهرباء إضافية. لكن البلوتونيوم بحد ذاته سم قاتل، وتقول الإشاعة إن بناء قنبلة نووية منه بصورة سرية أمر في غاية السهولة. قامت شركة كهرباء يابانية سنة 1999 بإرسال بعض ما لديها من اليورانيوم المنضَّب لإعادة معالجته في إنجلترا، وقد أرسل البلوتونيوم الناتج إلى اليابان بواسطة سفينة نقل بحرية، وذلك ما أثار تحسساً شديداً حول العالم، وبخاصة أن السفينة كانت عرضة للاختطاف من قبل الإرهابيين. واحتمال فصل البلوتونيوم تجارياً غير متوقع للسنين الخمسين القادمة في الأقل، وسبب ذلك امتلاك العالم لكميات كافية من اليورانيوم الخام. ويدعى أشد أنواع المفاعلات المزودة بوقود البلوتونيوم تطرفاً بالمفاعل المولِد (Breeder Reactor). والبلوتونيوم في هذا المفاعل ليس مجرد ناتج عرضي، فالمفاعل مصمم بالدرجة الأولى لإنتاج البلوتونيوم بكفاءة، والحرارة (ونتيجة لذلك الكهرباء) كناتج عرضي - التصميم الملائم يتضمن إيجاد مواد لا تمتص النيوترونات، وهدف ذلك الحصول على أكبر عدد ممكن من النيوترونات بدل ذلك ليمتصها U_{238}. وقد دعت ورقة هابرت سنة 1956 لعملية التوليد باسم «الحرق المحفَّز» لليورانيوم U_{238}. والعامل الحفاز في الكيمياء الاعتيادية هو شيء يزيد من سرعة التفاعل من غير أن يُستهلك هو ذاته. والبلوتونيوم في المفاعل المولد يُستهلك، لكن يتم توليد بلوتونيوم جديد من خلال اقتناص النيوترونات، وما يستهلك فعلاً بطريقة مستمرة هو U_{238}، فيما يعمل البلوتونيوم كعامل حفاز.



يعتبر مفاعل سوبرفينيكس (Superphénix) الذي تبلغ قوته 1200 ميغاواط في فرنسا أكبر مفاعل مولد في العالم. وكان هذا المفاعل أثناء سنوات من الفحوص قد أوقف للإصلاح أكثر من نصف الوقت ثم أقفل نهائياً سنة 1996. (تييري ساليو (Thierry Saliou)، أسوشيتد برس).

كان مفاعل مولد أميركي تجاري قيد العمل قرب مونرو في ولاية ميشيغان من سنة 1966 لغاية سنة 1972. وقامت فرنسا في برنامج أكثر طموحاً ببناء مفاعلات توليد أكبر دعيت (Phenix) و(Superphenix). وقد أوقف الأخير عن العمل سنة 1995، وتقدر كلفة تنظيف موقعه بأكثر من مليار دولار.

وهناك توافق بين مفاعل البلوتونيوم المُولِّد وطريقة الاندماج «النظيفة»، التي يتم تطويرها، فالاندماج يستغل الهيدروجين الثقيل الموجود طبيعياً، والمعروف باسم ديوتيريوم كوقود. أما عامل التفاعل الأخير، فهو الهيدروجين الأثقل والمدعو تريتيوم. والتريتيوم يوجد

في الطبيعة لكن بكميات ضئيلة لا تصدق، وعلى مفاعلات الاندماج أن تولد التريتيوم الذي تحتاجه. ويخدم امتصاص النيوترونات الناتجة عن الاندماج في غطاء من الليثيوم هدفين: استبدال التريتيوم، واستعادة الحرارة الناتجة عن الاندماج. ومن هذا المنظور، يتحول مفاعل الاندماج إلى مفاعل توليد. ويكون التريتيوم العامل الحفاز، بينما يصبح الديوتيريوم هو الوقود.

مصادر اليورانيوم

رغم أن اليورانيوم كان معروفاً للكيمائيين منذ سنة 1789، إلا أنه لم يحظَ بسوق تجارية له منذئذٍ. وكانت كميات قليلة منه قد استخدمت منذ الأزمنة الرومانية لإعطاء لون أصفر مشعّ إلى الزجاج. وكان مصدر اليورانيوم الوحيد من عملية تعدين معادن أخرى، حيث يُفصل كناتج عرضي. ويعَدّ منجم اليورانيوم - الفضة في يواخيمستال (Joachimsthal) في تشيكوسلوفاكيا، وفي الجزء الذي أصبح ضمن جمهورية التشيك اليوم، أكبر مصدر لليورانيوم قبل سنة 1900. وقد أعطت تلك المنطقة للنقود الفضية التي تسكُها تسميتها (تالر Thaller)، والتي حورت لتصبح «دولار». وكنت عند إلقاء محاضراتي على طلبة الجامعة أعلمهم بأن تسمية الدولار الأميركي هائل القدرة جاءتنا من منجم لليورانيوم في تشيكوسلوفاكيا. وكان ذلك يولد نظرات شك على طول القاعة وعرضها.

وعندما قامت ماري كوري سنة 1898 بفصل الراديوم والرادون من خام اليورانيوم المستخرج من يواخيمستال، اتخذ المنتوج العرضي أهمية جديدة، فقد كان الراديوم والرادون جزءاً من سلسلة من العناصر الطبيعية المشعة تقوم بتحويل اليوارنيوم ببطء إلى رصاص. ووجد أن كلا العنصرين، أي الراديوم والرادون، لهما فائدة

في معالجة السرطان. وبدأ العمل في منجمين جديدين لليورانيوم، وأصبح المنتوج العرضي منتوجاً أساسياً الآن. كان أحد المنجمين في شينكولوبوي (Shinkolobwe) في جنوب الكونغو، أما الآخر فكان منجم غرين بير لايك (Great Bear Lake) في شمال كندا. وأنتج بعض اليورانيوم أيضاً كناتج عرضي عند تعدين الفناديوم في جزء من هضبة كولورادو الواقع في ولاية يوتا.

وكان افتقاد التجهيز إلى مصدر وطني لليورانيوم قد أعاق الجهد الأميركي أثناء الحرب العالمية الثانية لبناء القنابل الذرية. لكن كمية من خام اليوارنيوم عالى الجودة تبلغ 1250 طن من منجم شينكولوبوي وجدت في براميل من الصلب في مخزن في ستاتن آيلاند. وكان السيد إدغار سينغير (Edgar Sengier) المدير العام لشركة التعدين قد استورد خام اليورانيوم هذا، متوقعاً أن تصبح له قيمة جيدة[6]. وبعد سنة 1945 أو خلال معظم فترة الحرب الباردة، كانت هناك اندفاعة كبيرة للبحث عن خامات اليورانيوم في الولايات المتحدة. وكانت كل شاحنة صغيرة قبل ذلك تبطئ لمراقبة مجموعة من الجيولوجيين يتفحصون صخوراً عارية على جانب طريق لتسألهم «عم تبحثون يا رجال، أهو الذهب؟».

لكن من 1945 ولغاية 1985 كان السؤال: «ما الذي تبحثون عنه يا رجال، أهو اليورانيوم؟»، إلاّ أنه، وبعد سنة 1985، انخفض سعر اليورانيوم وارتفعت أسعار الذهب، فكنا فعلاً نبحث عن الذهب.

كان البحث عن اليورانيوم أسهل، وذلك بسبب إشعاعيته. تتكوّن إشعاعية اليورانيوم النقي بحد ذاته من جزيئات ألفا التي يمكن

---

(6) انظر: Leslie R. Groves, *Now it can be Told: The Story of the Manhattan Project* (New York: Harper, 1962), pp. 34-37.

حجبها بورقة رقيقة واحدة. لكن خامات اليورانيوم الطبيعي تحتوي، من ناحية أخرى، على سلسلة كاملة من العناصر المشعة في مراحل التحلل من اليورانيوم إلى الرصاص. ويطلق بضع من هذه المراحل الإشعاعية ضمن السلسلة أشعة غاما التي يمكنها اختراق بضعة أقدام من الصخور. لذا، فإن جهاز قياس الفعالية الإشعاعية اليدوي يمثل مساعدة هائلة في هذا البحث: وبدا لفترة أن كل شاحنة صغيرة في غرب الولايات المتحدة كنت تحمل جهازاً من هذا النوع. والأحسن من ذلك أن أدوات قياس إشعاعية في طائرات على ارتفاع واطئ يمكنها مسح مساحات واسعة. وكانت الطائرة بالنسبة للمنقبين عن المعادن سلاحاً ذا حدين، ففي المراحل المبكرة، وعندما كانت طائرة تكتشف بقعة مشعة ساخنة، فإن الطيار سيطير فوق المنطقة ذات الخلفية الشاذة جيئة وذهاباً ليرى أبعادها. بعد ذلك ستهبط الطائرة في مطارها، وستذهب المجموعة إلى المنطقة لتثبت حقوق التعدين فيها. وعندما يصلون سيجدون على أي حال ادعاءات حديثة بحقوق تعدين على الغالب، فالناس على الأرض رأوا الطائرة تدور وتدور حولهم، وبسرعة تعلمت طائرات المسح على الاستمرار بالطيران في خط مستقيم حتى ولو صادفت منطقة ساخنة.

ويمكن، إضافة إلى مقاييس الإشعاع السطحية، تدلية مقاييس مشابهة معلقة على حبال في حفر استشكافية. ويجري في الصناعة النفطية، وفي كل بئر يحفر تقريباً، مسح بجهاز قياس الإشعاع معلق على طول البئر. والهدف هنا ليس البحث عن اليورانيوم، بل عن الاختلاف في المقدار الضئيل للإشعاع البسيط في الطبقات الصخرية، وفي ذلك أدلة مفيدة عن نوع الصخور. في سنة 1959، اكتشفت في حوض بارادوكس في يوتا قراءة إشعاعية عالية جداً في سجل مسح أحد الآبار النفطية. ربما كان سببها ترسبات من اليوارنيوم، لكنها

كانت على عمق يربو على ميل تحت الأرض، وهذا أعمق من أن يجعل المنجم تجارياً. وبذلك احتفظت بعملي.

تتضمن جيوكيمياء اليورانيوم التفاعلات بين نوعين مختلفين من مستويات التأكسد: U^{4+} وU^{6+}. والنوع الثاني هو الأكثر تأكسداً، أما الأول فهو مختزل. في أوضاع اليوم الحاضر الجوية، يمسك U^{6+} بالأيدي مع الأوكسجين والكاربونات ليشكل مركباً معقداً يذوب في الماء. يأتي معظم اليورانيوم المعدّن في غربي الولايات المتحدة، من أوجه التقاء بين حالتي التأكسد والاختزال. وإليك طريقة عمله. تنساب المياه السطحية حاملة معها الأوكسجين المذاب ومقادير ضئيلة من اليورنيوم القابل للذوبان خلال الحجر الرملي، حتى تلتقي قطع من المواد العضوية في الحجر الرملي.

وتتأكسد المواد العضوية مستفيدة من الأوكسجين يتحول اليورانيوم بالنتيجة من مركبات U^{+6} المعقدة الذائبة إلى حالة U^{+4} غير الذائبة، فتتراكم عبر الدهور الجيولوجية مقادير تجارية قابلة للتعدين في أوجه التقاء بين حالتي اليورانيوم المؤكسدة والمختزلة. والتنقيب عن هذه الرواسب منهجي، لأن الجزء المؤكسد من الحجر الرملي ذو لون أصفر إلى برتقالي بينما يكون الجزء المختزل ذا لون رمادي بسبب المادة العضوية. وإذا ما صادف جهاز الحفر عندك حجراً رملياً رمادي اللون في الجزء الشرقي لمنطقة الاستكشاف، وآخر بلون أصفر إلى برتقالي في الجزء الغربي، فستعلم أن المادة المطلوبة في موضع ما في الوسط. اختر موقعاً وسطياً تقريباً واحفر ثانية، وإذا ما صادفك اللون الرمادي فانتقل إلى الغرب، وإذا ما كان اللون أصفر برتقالياً، فانتقل إلى الشرق، واستمر في قسمة الموقع، وستصل إلى الموقع المطلوب في النتيجة.

وهناك إمكانية لاستخلاص اليورانيوم في الموقع الذي ترسب

فيه من خلال جريان الماء في «الحجر الرملي» بواسطة دفق مواد كيميائية خلال نفس الصخور (الاستخلاص في الموقع). وبهذه الطريقة لن يكون هناك منجم محفور تحت الأرض ولن يتعرض عمال المناجم للرداون، ولن ترى معدات ثقيلة. بدا أحد مناجم اليورانيوم في جنوب تكساس مثل حقل نفطي مصنوع من ألاعيب صغيرة، فالآبار والأنابيب والخزانات كلها كانت بنحو عُشر الحجم الذي نراه في حقل نفطي.

ولم يحتوِ جو كوكب الأرض في بدايته على أوكسجين حر، لذا كان اليورانيوم بصورة U^{4+} هو الهيئة الوحيدة المستقرة، ولم يحدث أي تحول إلى U^{6+} أو إلى يورانيوم قابل للذوبان في الماء. كانت مادة اليورانايت المعدنية (UO_2) في تلك البيئة قادرة على الانطلاق في الرمال النهرية بهيئة حبيبات صلبة خاملة. وحبيبات اليورانايت ثقيلة، وتنفصل بنفس طريقة انفصال حبيبات الذهب عند ترسيبها. لذلك، أصبح هذا الأمر ذا أهمية كبرى في أفريقيا الجنوبية، فترسبات الذهب في منطقة ويتووترزراند (Witwatersrand) التي اكتشفت سنة 1886 قد أنتجت أكثر من نصف الذهب الذي عُدّن في كافة أرجاء العالم. وتحتوي خامات الذهب على اليورانيوم أيضاً. ونشرت في سنة 1961 أدلة جيدة تشير إلى أن هذه الترسبات الذهبية قد تراكمت قبل 2,7 مليار سنة[7]. ولم يحو جو الأرض آنذاك أوكسجيناً، وكانت الخامات التي نجمت تحوي ترسبات يورانيوم، مثلما حوت ترسبات ذهب. ارتفع خلال عقد الستينيات سعر اليورانيوم بدرجة يسرت للمناجم في جنوب أفريقيا أرباحاً

---

(7) انظر: Robert Hargraves, «Cross - Bedding and Ripple- Marks in Main-Bird Quartzites in the East Rand Area: A Reconnaissance Study,» *Information Circular*, vol. 5 (1961).

من اليورانيوم فاقت أرباحها من الذهب.

أخبرني أحد أصدقائي ممن كان يعمل ضمن مجموعة حفر تبحث عن امتداد لترسبات خام ويتووترزراند، فمع تزايد وتزايد قيمة الذهب في لباب الصخور المحفورة (drill cores)، توقفت إدارة الشركة عن إعلام كادر الحفر بنتائج تحليل الذهب. لكن كادر الحفر كان لديه على أي حال مقياس للإشعاع يمكن تدليته في البئر المحفور للكشف عن اليورانيوم. وبسبب معرفة الكادر المسبقة بالنسبة التقريبية للذهب الموافقة لمقدار محدد من الإشعاع، كان باستطاعة أعضائه وضع خريطة للترسبات تحت ـ السطحية بجهودهم وحدها. لكن ما نفع تلك المعلومات؟ يمكن استغلالها في شراء أراض للبناء في المدن القريبة، لأن منجماً رئيسياً سيظهر هناك عما قريب.

في حدود سنة 1975 اكتشف نوع جديد وغير متوقع من ترسبات اليورانيوم في كندا وفي أستراليا. وكانت الترسبات في صخور رملية، شبيهة بتلك التي وجدت في الغرب الأميركي، لكن بدلاً من تواجدها عند حدود التأكسد ـ الاختزال، كانت مخبّأة عند قاعدة الحجر الرملي. وبدلاً أيضاً من ظهورها في وسط تراكمات صخور رسوبية، كانت في موقع تماس الحجر الرملي مع صخور تحتية أقدم جداً. وكان موقع التماس مع صخور أقدم حسب العرف الجيولوجي أمراً شاذاً. وعليه، تدعى رواسب اليوارنيوم المكتشفة حديثاً بالرواسب شاذة النوع. ولا يزال أصل هذا النوع من رواسب اليورانيوم الشاذة بعد ثلاثين سنة من اكتشافها غير مفهوم جيداً، لكنها رواسب كبيرة وتمتلك خامات ذات نوعية متميزة. وتنتج الرواسب في كندا وفي أستراليا في ما بينها 90٪ من اليورانيوم في العالم.

يحوي منجم ماك آرثر ريفر في كندا نوعاً من الخام يبلغ معدل

أوكسيد اليورانيوم فيه 21٪[8]. ولم تكن هناك طريقة عملية لحماية عمال المنجم من الإشعاع. لذا وجد الكنديون طريقة ذكية من خلال استخدام نوع متاح من المعدات لتعدين الخام من دون تدخل بشري مباشر. ويدعى هذا النوع من المعدات بالحفّار الرافع (Raise Borer)، وتقوم الماكنة بحفر تجويف قطره عشرة أقدام خلال الخامة صعوداً إلى أعلى فيتساقط فتات الصخر على حزام ناقل في الأسفل. هذه الطريقة ليست هي الأرخص، لكنها رغم ذلك مربحة، لكون الخام ذا نوعية ممتازة، كما أن العاملين لا يرون الخام، وذلك لتجنيبهم التعرض للإشعاع.

مسألة المفاعل المولّد

قام نادي روما في كتابه الذي نشر سنة 1972 بعنوان (*The Limits to Growth*)، بتوجيه انتباه الناس إلى محددات الحضارة الصناعية[9] المستقبلية. ومع ذلك، لم يكن هناك أي معلومات جيولوجية، أوالقليل منها فقط، وكانت وزارة الطاقة في الولايات المتحدة نشرت ضمن دراسة أضيق نطاقاً سنة 1978، تقريراً يقول إن المفاعلات المولدة ستكون ضرورة بسبب التحديدات على تجهيز اليورانيوم الطبيعي. ولم يكن في هذه الدراسة ثانية، إلا القليل من الجيولوجيا، أو لا شيء على الإطلاق، وكل ما فعلوه قيامهم بقياس منحنيات جبرية في حاسوب، فإذا كان المنحنى الداخل ذا انحدار محدد، فستبرز الحاجة لمفاعل مولد. وكما تعرفون الآن، فإن مهنتي هي بيع الجيولوجيا، وعندما كنت طالباً في المرحلة الأساسية أدرس

(8) تعطى نتائج تحليل اليورانيوم تقليدياً ممثلة بـ U_3O_8 وهو مركب ذو تكافؤ مختلط. ولكون اليورانيوم ثقيل جداً ولا ينجم عن الأوكسجين فرق كبير. وفي حالة U_3O_8 يبلغ وزن اليورانيوم 85٪.

(9) انظر: Donella Meadows [et al.], *The Limits to Growth* (New York: Universe Books, 1972).

الجيولوجيا كانت العبارة المتداولة عندئذٍ «أن الحاضر هو مفتاح المستقبل». ويجب على كل من صناع السياسة، والمستقبليين، أن يحتفظوا باختصاصي الجيولوجيا قريباً منهم، وما ذروة هابرت إلا واحدة من المحددات الجيولوجية على مستقبل مجتمعنا.

كان هناك بعض الشك حول ما سيبدو عليه توزيع اليورانيوم، وحول مقدار اليورانيوم الذي يمكن استخراجه عند كل مرحلة من تردّي نوعية خامات اليورانيوم. كان هناك احتمالان تم اقتراحهما، أحدهما من ييل والآخر من برنستون. لقد ترتّب على الاختيار بين الاقتراحين مترتبات جسيمة على تطور مجتمعنا الصناعي. على مستوى أصغر، ولكن مهم، سيقرِّر الاختلاف بين نموذجي ييل وبرنستون متى أو أين ستبرز الحاجة إلى مفاعل مولد.

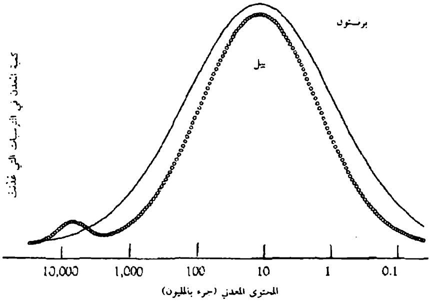
كان برايان سكينر (Brian Skinner)، وهو اختصاصي في الاقتصاد الجيولوجي قد وضع الخطوط البينية الافتراضية التي تبين نوعيات الخام مقابل كمياتها، وبيَّن أنها ذات قمتين[10]. وتُظهر القمة العليا انتشار المعدن في الصخور العادية، فالرصاص مثلاً يحتوي على حجم وشحنة كهربائية شبيهة بالكالسيوم، فيما تحوي الأحجار الاعتيادية مقادير كبيرة من الكالسيوم تصل في العادة إلى نسبة مئوية عالية. ويمكن لكميات قليلة من الرصاص أن «تختبئ» من خلال احتلال مواقع محجوزة عادة للكالسيوم. أشار سكينر، مع ذلك، إلى أن المعدن الثمين في الخامات القابلة للاستخراج اقتصادياً غير مختبئ، ويحوي الخام حبيبات معدنية يؤلف المعدن مكونها الرئيسي، فخامات الرصاص مثلاً تحوي في جميع الحالات تقريباً على كبريتيد الرصاص، أو ما يدعى الغالينا المعدني ورمزه PbS.

(10) انظر: Brian Skinner, «A Second Iron Age Ahead?,» *American Scientist*, vol. 64 (1976), pp. 258-269.

وبدل أن يقوم بالتعويض بكميات صغيرة، فالرصاص مكون رئيسي لهذا النوع من الخام المعدني. طرح سكينر بعد ذلك فكرته عن أن الخامات المعدنية ذات المقادير الضئيلة من الرصاص، وتلك ذات المكونات الرئيسية منه، هما وحشان مختلفان تماماً. لا يوجد شيء ما بينهما، وسيكون ما يترتب على ذلك بالنسبة للمجتمع شيئاً مثيراً: فما أن يستنفد الخام ذو المحتوى الجيد ستكون الطريقة الوحيدة لاستحصال الرصاص من خلال تعدين الصخور العادية، مثل الغرانيت لاستخلاص المقادير الضئيلة من الرصاص فيه. لقد أعطى سكينر مقالته العنوان المثير للاهتمام؟ *A Second Iron Age* (*Ahead?*). وكان استنتاجه أن استخدامنا للعناصر الكيميائية النادرة، مثل النحاس والزنك والكروم، سيتقلص وسيكون علينا الاعتماد على المعادن المبتذلة جيولوجياً، مثل الحديد والألمنيوم. لقد شعر سكينر بأن نموذجه ذو طبيعة عامة وينطبق على مجموعة من المعادن بما فيها اليورانيوم.

أما وجهة نظري، التي هي بخلاف رأي برايان سكينر، فتقول إن كل شيء سيسلك على نحو ما منحنى هابرت ذي الشكل الناقوسي، ما لم يثبت عكس ذلك. لكن برايان مع ذلك وضح لي نقطة فائقة الأهمية: إننا لا نستطيع تقديم الحل لهذه المشكلة من خلال أخذ قياسات مباشرة. افترض أنني كطالب شاب قمت بتطوير جهاز يقوم بإجراء تحليل للزنك كل ثانية ليلاً ونهاراً لأربعة وعشرين ساعة من أيام الأسبوع. إني هنا أترك باب بناية الجيولوجيا الخلفي في برنستون وأتجه بصورة عامة باتجاه سياتل (على الساحل الغربي) لأجمع نموذجاً من الصخر كل ثانية. وأبدى سكينر لي أني سأصل عمر التقاعد قبل أن أقوم بتحليل ما يكفي من الزنك في صخوره لأتمكن من القول ما إذا كان مصيباً. وإليك طريقة لفهم ما يشير إليه سكينر: كم عدد الصخور التي يجب أن ألتقطها عشوائياً قبل أن

أكتشف منجماً تجارياً للزنك صدفة؟ ربما يكون العدد أكبر ممّا أستطيع تحليله خلال مدى عمري وحد. ويستخدم لجيولوجيون الذين يكتشفون ترسبات الزنك التجارية إحساسات داخلية تستند إلى خبرة، وبخاصة استخدامهم لتماثلات مع مناجم الزنك الحالية. وليس هناك من طريقة لاختبار منظور ييل مقابل منظور برنستون من خلال قياسات مباشرة.



اقترح برايان سكينر (Brian Skinner) وهو أستاذ الجيولوجيا في جامعة ييل (Yale) أن العناصر غير الشائعة في قشرة الأرض (مثل النحاس) ستظهر توزيعاً ذا قمتين، كما يبدو في المنحنى المرسوم بالدوائر في هذا الشكل. وتقع الترسبات ذات النوعية الجيدة القابلة للتعدين اقتصادياً ضمن القمة الصغيرة إلى يسار المنحنى. وقد شككت في أن الترسبات ذات النوعية الجيدة لم تكن إلا الذيل في توزيع ناقوسي أحادي القمة. وهذا الشكل ليس إلا تشبيهاً للمفهوم. وفيما لو رسم حسب المقياس الحقيقي، فإن ترسبات الخامات إلى اليسار ستكون أصغر من أن تظهر. وهذه المنحنيات الناقوسية ليست منحنيات هابرت، إذ إن محور هابرت الأفقي هو الزمن. والمحور الأفقي على هذا المنحنى والمنحنيات التالية هو تمثيل لوغاريثمي (1، 10، 100، . . .) لتركيز المعدن.

يقدم اليورانيوم حالة اختبار مشوقة، فطائرة على ارتفاع منخفض تحمل جهاز قياس كبير للإشعاع بمعدل تحليل واحد للصخور كل ثانية. (وبالإضافة إلى اليورانيوم، هناك عنصران كيميائيان آخران يمتلكان كمّاً كبيراً من الفعالية الإشعاعية. وهما: الثوريوم والبوتاسيوم). ويتم في كل سنة مسح مليون قدم من ثقوب آبار النفط بواسطة أجهزة المسح المدلاة بالأسلاك. ويقدم مزج المكتبة الهائلة لسجلات قراءات المسح الإشعاعي مع محتوى اليورانيوم لخامات الرواسب التي تم تعدينها فرصة نادرة للاختبار ما بين نموذج بيل ذي القمتين وبين نموذج برنستون ذي القمة الواحدة. وسيحدد توزيع اليورانيوم إضافة إلى الاهتمام الأكاديمي الحاجة إلى المفاعلات المولدة.

لو كان التاريخ منظماً ودقيقاً، فإن التعدين كان سيبدأ بحفر أغنى الخامات ثم يلتفت إلى الخامات الأفقر بطريقة متدرجة. هذا الأمر صحيح بالنسبة للنحاس، تقريباً، أما بالنسبة لليورانيوم، فليس كذلك، فأفقر خامات اليورانيوم كانت تلك التي استخرجت بعد 1945 مباشرة. ولكي أعيد رسم الخط البياني الجيولوجي لمقدار اليورانيوم المتوفر عند درجات مختلفة لنوعية الخام، كان عليّ أن أهمل تاريخ تعدين ذلك الخام، وأن أقوم بترتيب تاريخ تعدين اليورانيوم ضمن درجات الخام المختلفة.

كان المشتري الشرعي الوحيد لليورانيوم في الولايات المتحدة خلال الفترة 1945 ولغاية 1960 هو هيئة الطاقة الذرية، التي أدرجت فيما بعد ضمن وزارة الطاقة. وكانت سجلات الخام الذي جرى تعدينه قد زودت إلى هيئة الطاقة الذرية مع الاتفاق على أن سجلات الشركات المفردة ستبقى سرية. وقمت سنة 1975 بطلب منحة بحث من وزارة الطاقة لتفحص سجلات المناجم ضمن جهد يهدف إلى وضعها ضمن المنظور الأكبر لليورانيوم في القشرة الأرضية. وكان

طلبي يتضمن منحة مالية وسماح للوصول إلى السجلات. وتبين أن طلب المنحة المالية كان لجزء الأسهل، فقد وضعت سجلات هيئة الطاقة الذرية ووزارة الطاقة مع حلول سنة 1975 على أشرطة حاسوبية داخل غرفة حاسوب مقيدة الدخول داخل بناية ذات طابق واحد، داخل سياج عال من الأسلاك الشائكة، على حافة غراند جنكشن (Grand Junction) في كولورادو. ولكي تحصل على إذن بالدخول داخل الأسلاك الشائكة يتوجب أخذ بصمات أصابعك والحصول على شهادة حسن سلوك من الأف. بي. آي، وكان زميليَ إيان ماك غريغور (Ian McGregor)، وهو جيولوجي في إجازة من جامعة كاليفورنيا في ديفيس، وجيم كوكولا (Jim Kukula)، وهو طالب في السنة الأخيرة بقسم الفيزياء في برنستون وخبير في البرامج الحاسوبية، قد ذهب صيف سنة 1976 للعمل في غراند جنكشن. وبين لهم المكتبيون الاتحاديون أن اتفاقية السرية بين الحكومة وشركات التعدين تنص على أن أي إحصائيات تنشر يجب أن تشمل معلومات تخص ثلاث شركات أو أكثر، ولكن قامت وزارة الطاقة في فترات قليلة بإطلاق معلومات تشمل شركتين فقط ممثلتين في صنف إحصائي. وتلقوا نتيجة ذلك مكالمات غاضبة من شركات كانت قد قامت بطرح أرقامها من المجموع المنشور لتحصل على أرقام الشركات الأخرى السرية، وافترضت أن منافسيها سيعملون الشيء ذاته. وللحفاظ على النظام، كان على ماك غريغور وكوكولا كتابة برنامج حاسوبي، كان في تلك الأيام يثقب على كارتات. وقاموا بتسليم مجموعة الكارتات المثقبة عبر منضدة خارج غرفة الحاسوب، لكنهم أُخبروا بعد يومين أن فاصلة في برنامجهم قد وضعت في الموضع الخطأ، وأن برنامجهم لم يشتغل. وبدأت أستلم مكالمات هاتفية تزداد معاناة من إيان، حتى وصلت إلى صراخ يعبر فيه عن الإحباط الذي أصابه، إذ إنه وزميله جيم لم يحرزا أي تقدم.

لكنهما، وببطء، تعلما النظام وتحسنت الوضعية من مقيتة بحتة إلى سيئة فقط. وحدد جيم كوكولا عبر مسيرته عدداً من الأخطاء في الوثائق الرسمية، فمجموع الإنتاج من مختلف المناجم المفردة لم يتوافق مع ما ادُّعي أنه إنتاج الولايات المتحدة. وسمع إيان وجيم إشاعات تقول أن وزارة الطاقة بدأت تستخدم أرقام جيم في السجلات «الرسمية». (وقد وردت تقارير بعد بضع سنين تقول إن احتساب وزارة الطاقة للبلوتونيوم واليورانيوم من الصنف المستخدم في القنابل كانت تُدخَل في دفتر أستاذ بقلم رصاص مع العديد من عمليات المحي. ولم تثر هذه المعلومات أقل دهشة لدينا).

وفي شهر آب/أغسطس ذهب إيان ماك غريغور في إجازة إلى عائلته. وحللت أنا محله في غراند جنكشن. ولم يكن أدائي بأحسن منه في البدء، لكن المعجزة حدثت بعد ذلك، فمعظم المكتبيين الاتحاديين كانوا على أهبة ترك الموقع في إجازة في النصف الثاني من شهر آب/ أغسطس. وأخبرنا أحدهم قبل أن يترك بأن المعلومات الأصلية الخام كانت على «الشريط رقم 7168، لكن لا تقولوا إني أخبرتكم بهذا». وكان في غرفة الحاسوب لديهم موظفون نهاريون وليليون، وقمنا أنا وجيم بالعمل ليلاً. كنت بعد ظهر كل يوم أقوم بزيارة أحد المخابز في المنطقة لأشتري المعجنات والمشروبات الغازية لنتشارك بها مع موظفي الحاسوب كوجبة خفيفة في منتصف الليل. وكنا وراء المنضدة! واستطعنا أنا وكوكولا في فترة أسبوعين أن نستحصل ما يكفي من المعلومات لوضع أطلس يحوي 500 صفحة عن إنتاج اليورانيوم في الولايات المتحدة[11].

---

(11) انظر . Kenneth Deffeyes, Ian MacGregor and James Kukula, *Uranium Distribution in Mined Deposits and in the Earth's Crust*, Final Report Prepared for the Department of Energy, Grand Junction, Colorado, 1978,

ولم تكن معرفة مقدار اليورانيوم في كل صنف من أصناف الخامات كافية ببساطة. وكان علينا أن نعرف ما إذا كان التوزيع متشابهاً في مواقع جغرافية مختلفة، وفي ترسبات ذات جيولوجيات مختلفة وفي مناجم ذات أعماق مختلفة، وما إلى ذلك. وكانت النتائج مسرّة جداً:

ـ كان ميل الخط البياني لمحتوى اليورانيوم مقابل صنف الخام جوهرياً ذاته لمختلف أنواع الترسبات.

ـ كلما انخفضت درجة الخام إلى نصف المحتوى كان هناك ستة أمثال اليورانيوم في الشريحة التالية. والعبارة المساوية تقول إن تردي نوعية الخام بمعامل يبلغ عشرة سيكشف عن مقدار من اليورانيوم يزيد بثلاثمائة مرة. وتبينت من ذلك حقيقة مفيدة واحدة: أن الخط البياني كان شديد الانحدار بدرجة لم تعد معها حاجة للمفاعل المولد، فهنالك الكثير من اليورانيوم لنعتمد عليه.

ـ يصف منحنى ناقوسي الشكل ذو قمة واحدة تركيز اليورانيوم في المناجم. وفي الترسبات غير التجارية، التي هي أفقر من أن تعدّن. وفي توزيع اليورانيوم في الصخور العادية. وكان البرهان هنالك: إذ كسبت برنستون في هذا الاشتباك الصغير وخسرت ييل.

وكان برايان سكينر إزاء منحنيات توفر المعادن ذات القمتين صامتاً، لكنه مع ذلك كان مقتنعاً بأن بقية المعادن تتبع النموذج ذا القمتين. وقد يكون محقاً بالنسبة لبعض هذه المعادن. وأعتقد أن معدن الكروم مثال محتمل لمعدن ليس له شيء بين ترسبات المحتوى الجيد والصخور العادية. ولعل هذه ليست إلا معركة صغيرة

---

* تدعى تقارير المشاريع من هذا النوع «الأدبيات الرمادية» (Gray Literature) لصعوبة تحديد موقع تواجدها، وتوجد نسخ من هذا التقرير موثقة في مكتبة جامعة برنستون.

في تنافس بين الكليات كان مستعراً منذ 250 سنة. لكن لا تقلقوا، فأنا وبرايان سكينر أصدقاء، إنما لفظة (ييل) في بيتي ليست كلمة محمودة.

يقول بعض النقاد أن توفر اليورانيوم يبدو كمنحنى له قمة واحدة كبيرة بسبب وجود عشرة أو عشرين نوعاً مختلفاً من ترسبات اليورانيوم، ولكل منها قمته. وإجابتي هنا هي «نعم!»، فالتوزيع الناقوسي يحدث عادة لأن عدداً من الأسباب الصغيرة تتجمع أحياناً لتصبح تأثيراً واحداً كبيراً.

بعد فترة من نشر نتائجنا حول اليورانيوم، أردنا أن نعلن عن ما وجدناه والحجة التي توصلنا إليها في عدم الحاجة الوشيكة للمفاعلات المولدة. ووقع اختيارنا على مجلة (*Scientific American*) بسبب انتشارها الواسع وبسبب اعتمادها على التأليف المباشر من قبل العلميين. ومع ذلك، فإن المحرر الذي عمل معنا وضح لنا بتأنٍّ أن الانصهار الذي حدث في ثري مايل آيلاند مؤخراً قد قضى على أي اهتمام مباشر باليورانيوم. وكان علينا الانتظار إلى كانون الثاني/ يناير 1980، حتى تم نشر المقالة. دعونا نتوقف الآن لنرى أين - هم - الآن:

- إن لم تستطع دحرهم، انضمَّ إليهم. أصبح أيان ماك غريغور بيروقراطياً اتحادياً يوزع منح البحوث لمؤسسة العلوم الوطنية. وقد أصبح مؤخراً المدير التنفيذي للتجمع الوطني لمدرسي العلوم الجيولوجية.

- أما جيم كوكولا، فهو اختصاصي حاسوب يعمل مع سينوبسيس (Synopsys) ويقوم بالتحقق من أن التصاميم المعقدة لرقاقات الحاسوب تؤدي ما يفترض بها أداؤه.

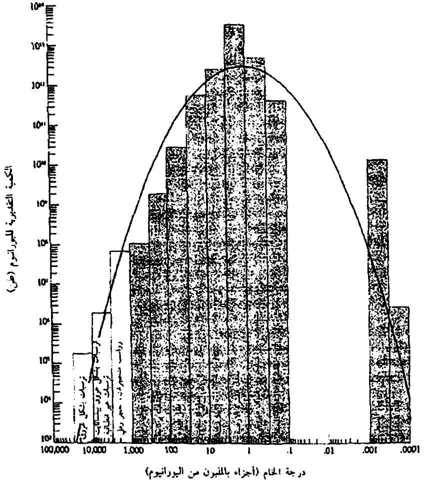
ـ المحرر الذي تعاملنا معه في مجلة (*Scientific American*) انتقل إلى وظائف أخرى، وهو المحرر الذي ساعد في تطوير واحتضان هذا الكتاب.

ـ أما أنا، فمتقاعد، وهوايتي هي الترويج للجيولوجيا. وج. إدغار هوفر يقضي الآن سنة في (المَطْهر)، وينتظر مني الدخول إلى غرفة الحاسوب في غراند جنكشن مستخدماً الحلويات كنوع من الرشوة.

التخلص من النفايات المشعة

يمكن لأي برنامج، بدءاً بقسم جيولوجيا إلى فريق كرة سلة، أن يصاب بالشلل من خلال وضع معايير مبالغ فيها. وقد استخدمت المعايير البيئية الصارمة خلال السنين العشرين المنصرمة كوسيلة لإسقاط أي برنامج. دعوني أقرّ هنا بأحد أخطائي. أرادت القوة الجوية للولايات المتحدة في السبعينيات أن تضع قواعد صواريخ MX في مقاطعة Basin and Range بنيفادا ويوتا الغربية. وكان بعضنا قلقاً أن تكون هذه الصواريخ إستراتيجية الردع، فقد كانت أشبه بالسايلو، وهو نظام صُمِّم لتدمير الصواريخ السوفياتية قبل انطلاقها، وبعبارة أخرى سلاح يستخدم لأول مرة. وعلى النقيض من هذا النظام، لا تطلق الصواريخ النووية في الغواصات الأميركية على الفور في حال الأزمات، إذ إنها تعتمد على التوازنات في الحرب، وليس الاستباق في الردع. كان هنالك نوعان من «الإطلاق» عند الشعور بالخطر، وكلاهما مخيف. يأخذ النوع الأول مداه خلال الـ 15 دقيقة الفاصلة بين اكتشاف الصاروخ العدو وهو منطلق باتجاهنا، وبين الوقت الذي يستغرقه الـ MX ليكون في طريقه لملاقاة الهدف. والنوع الثاني يعود إلى العصاب السياسي: فأي جانب يمكن أن

يصبح مقتنعاً بأن غريمه سيقوم بضربة استباقية. يضاف إلى حالة العصاب الأخطاء التكنولوجية، مثلما يحدث عندما يمر سرب من الأوز أمام هوائي رادار.



تم رسم توزيع اليورانيوم في قشرة الأرض بين مكامن الخزن الجيولوجية الرئيسية على مخطط لوغاريتمي - لوغاريتمي. وتمثل الأعمدة الأصناف المختلفة لترسبات الخامات (في نسق متناقص لمحتوى الخام) وهي تحدد منحنى لوغاريتمي للوفرة العادية العالمية والذي يتخذ شكل قطع مكافئ في هذه الحالة منفتحاً نحو الأسفل (المنحنى الأسود). والنقطة المهمة هي ميل القطع المكافئ في الزاوية اليسرى السفلى. ولا من حاجة للمفاعل المولد، لأن كميات كافية من اليورانيوم متوفرة كلما تردت نوعية الخامات. (جيفري ل. وارد)

أظهرت مساهمتي الصغيرة في قاعدة المعلومات حقيقة وجود مادة معدنية طبيعته مسببة للسرطان، وأكثر ضرراً بكثير من الإسبستوس، في العديد من أحواض نيفادا، وكانت واحدة من عديد من الاعتراضات البيئية ضد وضع قاعدة صواريخ MX في مقاطعة Range and Basin . وأهملت إدارة ريغان في النهاية فكرة وضع صورايخ MX في منطقة نيفادا ـ يوتا، قائلة إن البيئيين يستطيعون إبقاءها في المحاكم إلى ما لا نهاية.

سبق وألصقت بي تهمة كوني «مخادعاً فكرياً» من قبل أنطونيا شايس (Antonia Chayes)، وهي مساعدة وزير القوة الجوية لاستخدامي ذريعة المعارضة البيئية، لأنني كنت أكره MX كنظام تسليح. وأقر بأني مذنب في هذا الخصوص. لكني لم أزوّر الوقائع، فالمادة المعدنية المسرطنة موجودة فعلاً هناك. وعلى أي حال فقد تعنيّت المتاعب عبر لفت النظر إلى المشكلة، لأنني فكرت بأن MX كان نظام تسليح غير سليم.

وحيث إن الإمساك بمحتال يتطلب محتالاً آخر، دعونا ننظر في طرق التخلص من النفايات الإشعاعية. **القاعدة الأولى** للحركة البيئية التعويضية ـ مثل اعتراضاتي على MX ـ تتسم بوضع معايير عالية جداً. وفي حالة النفايات المشعة يكون المعيار بسيطاً: يجب أن تُخزَن حيث لا يمكن لها أن تتسرب خلال عشرة أضعاف زمن عمر نصف أطول مادة مشعة في النفايات. وللبلوتونيوم 239 عمر نصفي يبلغ 24100 سنة، لذا فإن عشرة أمثال عمر نصفه يبلغ 241000 سنة. وخلال تلك الفترة، مررنا بثلاثة عصور جليدية. لكن لغرض القياس، متى ستصبح النفايات أقل إشعاعية من خامات اليورانيوم التي عُدِّنت لتلقّم المفاعل؟ في حدود 15000 سنة تقريباً. ولا يعني هذا أن نبقى متساهلين حيال التخلص من النفايات، وإنما نقول

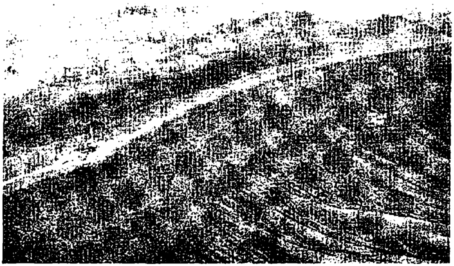
ببساطة أن المحددات المتاحة قد وضعت بأعلى قدر ممكن. ومقياس المشكلة مهم أيضاً، فإذا حصلت على 100٪ من كهربائك من محطات نووية لطول فترة حياتك، فكم ستكون حصتك من النفايات المشعة؟ إنها بحجم قبضة باب.

والوسيلة التكتيكية الثانية هي التعويض بإجابة سيئة عن المسألة بدل إعطاء أحسن الحلول، ومن ثم الشروع بهجوم على الطريقة السيئة لتناول الموضوع. كان من الواضح قبل خمسين سنة أن الأحواض الرسوبية من الهالايت (ملح الطعام الاعتيادي) والأنهيدرايت (كبريتات الكالسيوم) كانت أكفأ أنواع الختوم، أو الكتوم على قمة المكامن النفطية والغازية، كما أن الكثير من حقول النفط العظيمة في الشرق الأوسط فيها طبقات من الأنهيدرات فوق النفط والغاز. ولا يتسرب النفط أو الغاز أو حتى الهيليوم من الأنهيدرايت. وكان تقرير أعد سنة 1957 عن التخلص من النفايات الإشعاعية قد بحث في استخدام أحواض الهلايات أو «الأنهيدرايت»[12]. ويقع موضع التخلص من النفايات المشعّة العسكرية في ولاية نيومكسيكو في حوض من الهالايت (الملح) المدعو WIPP. ويقودنا هذا إلى جبال يوكا.

---

(12) انـــظـــر: Harry Hess, *The Disposal of Radioactive Wastes on Land* (Washington, D. C.: National Academies Press, 1957), pp. 12-81,

وكان م. كينغ هابرت (M. King Hubbert) عضواً في تلك اللجنة.



جبال يوكا هو موقع للتخلص من النفايات المشعة في منطقة غير مأهولة مجاورة للحافة الغربية لموقع التجارب النووية السابق في نيفادا. وجهاز الحفر على اليسار يقوم بحفر بئر في مستوى الدفن المقترح. (وزارة الطاقة في الولايات المتحدة (U.S. Department of Energy)، مكتبة التصوير العلمية (Science Photo Library)).

أما الموقع الأصلي المقترح سنة 1972 للتخلص من النفايات من الاستخدام المدني، فكان في حوض من الهالايت في ولاية كنساس. لكن سكان كنساس صرخوا: «ل ن ف ح خ» (لا نريده في حديقتنا الخلفية). وقاد الضغط السياسي في النهاية إلى جبال يوكا المجاورة لموقع الاختبارات النووية غير الفعال في نيفادا. كنت لسنين أوقف سفرتي الحقلية لطلاب السنة الأولى على الطريق العام مقابل جبال يوكا وأسأل «لمن يعود هذا الفناء الخلفي؟». وتستطيع في ذلك الموقع أن تستدير 360 درجة لتجد أن الأثر الوحيد للفعالية الإنسانية هو الطريق العام. تمتلك جبال يوكا فوالق فعلية ومجازية، وليس هناك من أثر للهالايت أو الأنهيدرايت. ولا أدعى هنا أن جبال يوكا

لا يمكن استخدامها كموقع امن، فاعتراضات (لا نريده في حديقتنا الخلفية) عوضت بجبال يوكا التي تسهل مهاجمتها كبديل عن المواقع الأفضل.

لقد منحنا اختيار جبال يوكا شيئاً من الكوميديا، فالموقع هو ضمن مقاطعة (ناي) في ولاية نيفادا، ومساحة مقاطعة ناي أكبر من مساحة ولايات نيوجرسي وماساشوسيتس وديلاوير وورود آيلاند مجتمعة، وكانت تعويضات اتحادية ستمنح إلى مقاطعة ناي لتقبلها النفايات النووية في أراضيها. حاولت حكومة ولاية نيفادا، بالتغطية على ذلك، استحداث مقاطعة جديدة تشتمل على جبال يوكا فقط. ودعيت تلك المقاطعة بلفروغ (Bulfrog county) تبعاً لاسم منجم ذهب قديم. ولم يكن لهذا المقاطعة مسؤول مفوّض، أو مدير شرطة، ولا حتى موازنة. وبهذه الطريقة ستنساب كل مبالغ التعويضات الاتحادية إلى حكومة ولاية نيفادا. وحاولت من دون نجاح أن أفكر في جرم ما أستطيع أن اقترفه في هذه المقاطعة يمر من دون عقاب. لكن هذه المقاطعة لم تَرَ النور، فقد كانت أشبه بشيء من صنع مارك توين.

الصورة الحالية

- تعتمد فرنسا على الطاقة النووية لتوليد 77٪ من كهربائها.

- شملت مشاكل التنظيف من برامج الولايات المتحدة السابقة، والمصنفة امتداداً من كبيرة (روكي فلاتس، كولورادو) إلى هائلة (هانفورد، ولاية واشنطن) إلى ما لا - أريد - أن أفكر به (أركو، أيداهو).

- اعتُبر التوليد المتزامن للحرارة والكهرباء والهيدروجين المنتَج من التحليل الكهربائي للماء موضوعاً تحت النظر للمساعدة في استخراج النفط من رمال القار الكندية.

ـ أقر مجلس الشيوخ في الولايات المتحدة سنة 2003 وذلك للمرة الأولى منذ سنة 1980 قانوناً يوفر ضمانات قروض لبناء محطة نووية.

لقد كان انتظار أول محطة كهرباء نووية جديدة في الولايات المتحدة منذ سنة 1980 شبيهاً بانتظار السيد المسيح (في بعثته الأولى أو الثانية ولك الاختيار). وكان لا بد لذلك أن يحصل في النهاية. والمسألة هي بأن كان أي منا سيعيش ما فيه الكفاية ليراها تتجسد.

لقد كان م. كينغ هابرت حسب وجهة نظري مصيباً: فالتوسع في استخدام الطاقة النووية يكون بمثابة رد فعل مهم للتناقص المتزايد في النفط والغاز. وبإمكان القوة النووية حل جزء من مشكلة الطاقة لكنه جزء كبير. ولن يكون من السهل استحصال موافقة الجمهور على سلامة المفاعلات أو تكاملية طريقة التخلص من النفايات. ويقول بعض المراقبين إن نقصاً حاداً ومؤلماً في الطاقة يجب أن يحدث قبل أن يتقبل الجمهور هذه التغييرات، والتوسع في الطاقة النووية ليس إلا واحداً من التغييرات العديدة التي يستطيع المرء مشاهدتها من نقطة مشرفة على ذروة هابرت.

الفصل التاسع

الهيدروجين

نعم يا أصدقائي، إني أعتقد أن الماء سيستخدم يوماً ما كوقود، فسيوفر الأوكسجين والهيدروجين اللذين يشكلانه، عندما يستخدم كل منها مفرداً أو سوية، مصدراً للحرارة والضوء غير قابل للنضوب.

جول فيرن

Jules Verne, *The Mysterious Island*, 1874

ليس الهيدروجين بالوقود الذي يأتي من الأرض. لكن هذا الفصل مع ذلك قد أدرج لأن الهيدروجين كان موضع بحث واسع كعلاج لمشاكل الطاقة في العالم، فاستخدام الكهرباء لتحويل الماء إلى هيدروجين وأوكسجين كان معروفاً لسبعين عاماً قبل أن يكتب عنه جول فيرن سنة 1874. إن عبارة «اقتصاد الهيدروجين» كانت قد صاغتها جنرال موتوز سنة 1970. وفي سنة 2002 أعلن الرئيس بوش خططاً لسيارة تعمل بالهيدروجين دعاها «سيارة الحرية»، وادعى أنها ستتوفر خلال عشر إلى عشرين سنة. ونشر جيريمي ريفكن (Jeremy Rifkin) في ذات السنة كتاباً عنوانه **اقتصاد الهيدروجين**[1] (*The*

---

(1) انظر: Jeremy Rifkin, *The Hydrogen Economy* (New York: Penguin Putnam, 2002).

(*Hydrogen Economy*). وفي لحظة حماس سنة 2003، قام ريفكن بعمل مماثل لـ «قانون مور» الذي ينص على أن عدد الترانزستورات في دائرة متكاملة يتضاعف كل ثمانية عشر شهراً. وأضاف أن «هناك ثورة في الطاقة تحدث وتشبه ما رأيناه من ثورة في الحواسيب المحمولة. وقد بدأ قانون مور تطبيقاته في خلايا الوقود»[2].

هنالك حدود للسحر يمكن إحرازه في اقتصاد الهيدروجين. وعلينا أن نتساءل عما إذا كان المفهوم قد أخذ حجماً أكبر مما يستحق. ومع ذلك فهناك خبران مشجعان:

ـ ليس هناك من حاجز علمي بحت لاستخدام الكهرباء المولدة من الريح أو الطاقة الشمسية لإنتاج الهيدروجين من الماء.

ـ قامت شركة شل بفتح محطة لملء الهيدروجين في أيسلندا وستليها محطات أخرى في أقطار أخرى.

إن استخدام سيارات غير ملوِّثة للبيئة تزوَّد بالقوة من مصدر طاقة متجددة، سيكون إنجازاً نرغب به من كل قلبنا، فهل أن اقتصاد الهيدروجين هدف قابل للتحقيق؟ ينقسم هذا السؤال بطبيعته إلى جزأين:

ـ هل إن الهيدروجين حل فعال للمشكلة؟ فهل ينبغي صرف طاقة أكبر للتزود الهيدروجين مما نستحصل عليه عندما نقود السيارة؟ وعلى سبيل المثال، عندما اقتُرحت لأول مرة طائرة SR - 71 المدعوة بلاك بيرد، ذات السرعة التي تفوق الصوت، اقتُرح الهيدروجين وقوداً لها. لكن كيلي جونسون (Kelly Johnson)، مدير مصانع لوكهيد سكنك وركس (Lockheed Skunk Works)

(2) انظر: Erik Rhey, «Fuel Cells,» *PC Magazine*, vol. 22 (July 2003), p. 92.

الأسطورية، قرر في النهاية أن الطائرة ستكون أفضل باستخدام وقود النفاثات الهيدروكاربوني التقليدي.

- هل بإمكاننا إنجاز تحول نظامي من سياراتنا التي يوفر البنزين الطاقة لها إلى أسطول يعمل بالهيدروجين؟ هل لدينا مشكلة البيضة - الدجاجة؟ فالشركات ستصنع سيارات تعمل بالهيدروجين إذا ما كان هناك محطات لتعبئة الهيدروجين. وبدورها ستفتتح محطات تعبئة بالهيدروجين إذا ما كان هناك سيارات تعمل بالهيدروجين. وبإمكان الحكومات هنا وبطريقة شرعية توفير حل لمعضلة البيضة - الدجاجة من خلال استخدام حوافز وقتية، مثل خفض الضرائب أو تقديم إعانات. وكلمة «وقتي» هنا هي الكلمة الفاعلة، ففي الكثير من الحالات يصبح المحفز الضريبي شيئاً دائمياً. ومرة أخرى هناك مثال، هو أن عدداً من التحليلات احتسبت أن إنتاج الكحول الأثيلي من الذرة يستهلك وقوداً أحفورياً أكثر مما يمكن استعادته عندما يحرق لكحول، فلماذا إذن نضيف الكحول إلى البنزين؟ فإذا ما أردت أن تربح الانتخاب في ولاية «زراعية» فصوّت لإعانات الكحول.

من أكبر عوامل الجذب للهيدروجين الوعد بقابلية التحرك، فنسبة 75٪ تقريباً من استهلاكنا الحالي للنفط يذهب للنقل: الطائرات والقطارات والسيارات والنقل البحري. والنقل بكافة أنواعه صنف معرض لخطر الزوال في حالة أي نقص في النفط. وهنالك العديد من الاستخدامات للهيدروجين كما أن له مردودات بيئية رئيسية. ومع ذلك، فإن السبب الحقيقي لاعتبار الهيدروجين وقوداً هو لتجديد علاقتنا الغرامية التي تقادم عليها الزمن مع السيارة.



ملء خزان حافلة في مدينة ريكيافيك (Reykjavik) بجزيرة أيسلندا (Iceland) بالهيدروجين في محطة تابعة لشركة شل (خدمات شل الفوتوغرافية، شركة شل العالمية).

ولا تبيع أي شركة الآن سيارات تعمل بالهيدروجين. والزبائن الأولين لمحطة شل لتعبئة الهيدروجين في أيسلندا هي ثلاثة حافلات من نوع ريادي تعمل في المدينة. والتقديرات لبدء مبيعات السيارات التي تعمل بالهيدروجين تتراوح بين ثلاث سنوات إلى عشرين سنة.

لو توفرت لديك طريقة مناسبة اقتصادياً لصنع الهيدروجين فبإمكانك أن تصبح بثراء التكساسيين الكبار الآن، ولن يكون عليك الانتظار للسيارات العاملة بالهيدروجين، فالسوق العالمية للهيدروجين تبلغ نحو مليار دولار في السنة. ويستهلك نحو 85٪ من الهيدروجين في استخدامين: صنع الأسمدة النايتروجينية وتحسين نوعية الزيوت في مصانع تكرير النفط.

الممارسات الحالية لإنتاج الهيدروجين

تأتي طرق إعداد الهيدروجين من الكيمياء والفيزياء (وربما من) البايولوجيا.

- الطرق الكيميائية هي تحويرات على طريقة غاز - الماء التي يبلغ عمرها مائتي سنة (وقد وصفت في الفصل الخامس). وفي ممارسة اليوم يحرق إما الغز (الميثان CH4) أو الفحم (ومعظمه كاربون) مع الهواء (أو الأوكسجين النقي) سوية مع البخار (الماء H_2O) لرفع درجة الحرارة إلى 1000 أو إلى 2000 ف. وتحتوي الغازات الناتجة عند تبريدها على كمية كبيرة من الهيدروجين الذي يمكن فصله واستخدامه.

- يمكن إمرار تيار كهربائي بين قطبين كهربائيين معدنيين مغمورين في الماء، وستبرز فقاعات من الهيدروجين عند القطب السالب، ويتحرر الأوكسجين عند القطب الموجب.

- لم يستخدم حتى هذا اليوم أي نظام بايولوجي أو بيوكيميائي لإنتاج الهيدروجين تجارياً، لكن تقارير وردت عن بعض التجمعات البكتيرية التي تنتج الهيدروجين.

ينتج معظم الهيدروجين موقعياً حيث سيستخدم. ولا يباع ويشترى سوى 3٪ من الهيدروجين المنتج في الولايات المتحدة. وأرخص الطرق اليوم لإنتاج الهيدروجين هي الطريقة الكيميائية الأولى التي أدرجت أعلاه، أي مفاعلة الغاز الطبيعي مع البخار والأوكسجين وعلى أي حال، فإن أسعار الغاز الطبيعي بقيت مرتفعة في ربيع 2003 بعد الشتاء القارص السابق عندما بدأت بضع مصانع أميركية للسماد كانت تستخدم الهيدروجين، المصنوع من الغاز الطبيعي والنايتروجين من الهواء تخسر، واضطرت إلى الإقفال. وعلى

هذه الأجزاء من صناعة الأسمدة أن تنتقل إلى أماكن أخرى حيث لا يزال هناك فائض من الغاز الطبيعي. وهذا معناه أن المهن ذات العلاقة ستنتقل إلى غرب سايبيريا إذا ما كان يهمك موضوع الانتقال.

التحويرات في طريقة (غاز ـ ماء)

يحتوي الميثان، وهو الجزيئة السائدة في الغاز الطبيعي، على أربع ذرات من الهيدروجين وذرة كاربون واحدة. ولكون الغاز الطبيعي غنياً بالهيدروجين إلى هذه الدرجة، لذا لا يضاف له أي أوكسجين، لينحصر التفاعل بين الميثان والبخار فقط.

$$CH_4 + 2H_2O = CO_2 + 4H_2$$

ويجري تسخين البخار والميثان إلى نحو 1500° درجة ف، ويتم التفاعل بوجود عامل مساعد من النيكل. وينتج عن هذا التفاعل أيضاً كميات كبيرة من أول أوكسيد الكاربون ذي السمية الكافية ليسبب حوادث مميتة. وتستخدم مجموعة معقدة من المفاعلات الإضافية لتحويل أول أوكسيد الكاربون إلى ثاني أوكسيد الكاربون ولتنقية الهيدروجين، كما تستخدم المبادلات الحرارية للغازات الساخنة الخارجة من المفاعلات للتسخين الأولي للغاز في مواقع أخرى من المنظومة. وقد كان الغاز الطبيعي، رغم تعقيد معمل المعالجة، أرخص مصدر للهيدروجين تاريخياً، وفي طريقة العمل الحالية، يرسل ثاني أوكسيد الكاربون بكل بساطة إلى المدخنة. هذا ويمكن أن يكون ثاني أوكسيد الكاربون مصدراً ثميناً لرفع نسبة استخلاص النفط من المكمن، وذلك إذا كان بالإمكان إنشاء مصانع لإنتاج الهيدروجين من الغاز الطبيعي المصاحب للنفط حقلياً.

يصبح الفحم الخيار الثاني عندما لا يتوفر الغاز الطبيعي. وقد كان الفحم الوقود الأصلي لإنتاج غاز الماء قبل قرنين من الزمن. ثم

طورت شركة تكساكو الطريقة الحديثة لإنتج الهيدروجين - من - الفحم قبل أن تصبح جزء من شيفرون/ تكساكو (ويتوفر لدى شل طريقة مشابهة). وقامت تكساكو، كما ذكرنا في الفصل الخامس، ببيع ثمانية مصانع من هذا النوع إلى الصين لإنتاج الأسمدة. وإليك اللفتة البارعة في تصميم تكساكو: الهدف من إنتاج الهيدروجين هو مفاعلته مع النايتروجين الجوي لإنتاج الأمونيا. ولما كان ذلك يستوجب فصل النايتروجين من الأوكسجين الجوي، قام مهندسو تكساكو بتلقيم المنتوج العرضي، وهو الأوكسجين النقي بدل الهواء في تفاعل (الفحم - البخار) الأولي. وينتج عن ذلك درجات حرارة أعلى. ولا يتحمل إنتاج النايتروجين من الجو كلفة عالية من مروره خلال الجزء المنتج للهيدروجين في المنظومة. ويمكن إضافة الأمونيا الناتجة إلى ماء الري مباشرة أو أن تحول إلى نترات الأمونيوم المتبلورة، أو إلى اليوريا الصلبة. وكل المنتجات الثلاث هي أسمدة فعالة.

ملاحظة تاريخية: كانت اليوريا أول منتوج «عضوي» صنّع كيميائياً من مواد غير عضوية. وكانت الفكرة السائدة قبل سنة 1828 تدّعي أن المواد العضوية لا تنتج إلا من قبل العضويات حصراً.

التحليل الكهربائي

يبدو إنتاج الهيدروجين والأوكسجين من الماء أسهل شيء في الوجود، فالطريقة معروفة منذ مائتي سنة وقد استخدمت تجارياً لخمسة وسبعين سنة من هذه السنين. القصة المشوقة الصغيرة: أن هيدروجين محطة تعبئة شل الجديدة في أيسلندا يولّد في خلايا تحليل كهربائي صنعتها نورسك هيدرو (Norsk Hydro). وكانت منشأة للتحليل الكهربائي في النرويج تدار سنتي 1943 أو 1944 من

قبل شركة نورسك هيدرو، المصدر الوحيد المتوفر لألمانيا لإنتاج الماء الثقيل (ديوتيريوم) الذي كانت تحتاجه لبناء مفاعل نووي. وقد دمرت غارتين للمغاوير، وغارة جوية، وعملية تخريب هذا المصدر، ومنعت في النهاية نقل الماء الثقيل من النرويج.

هناك أخبار جيدة وأخرى سيئة حول إنتاج الهيدروجين من خلال التحليل الكهربائي للماء. والتمييز هو بين التيار الكهربائي (الأمبيرية) والجهد الكهربائي (الفولتية). الأخبار الجيدة هي أن التيار الكهربائي الذي يمر خلال خلايا التحليل يولد الهيدروجين بكفاءة تبلغ 98٪. والأخبار السيئة هي أن الفولتية الكهربائية المطلوبة أعلى بمقدار من 20 إلى 35٪ من الفولتية الكهربائية (النظرية) المثالية. وإذا استخدم الهيدروجين بعد ذلك في خلايا وقود (هيدروجين ـ هواء)، فستتكرر القصة ذاتها، فالتيار يأتينا بكفاءة تبلغ 100٪ تقريباً، إنما هناك خسارة في الفولتية، فأنت تحصل على ما هو أقل من الفولتية المثالية، وتحتاج أكثر الخلايا التجارية المنتجة للهيدروجين كفاءة إلى فولتية تتراوح بين 1,75 و 2 فولت عملياً، أما خلايا الوقود فتنتج لنا نحو 0,7 فولت. والخلاصة، أن اقتصاد الهيدروجين يحمل معه ثمناً إضافياً، وأنت تحصل على 40٪ فقط مما وضعت. والمقامرة في لاس فيغاس تعطيك نتائج أفضل من هذا.

والسؤال هو: هل يمكن لبحوث إضافية أن تحسن من كفاءة الفولتية؟ لا يبدو ذلك محتملاً، فمن الناحية الإنتاجية يُظهر مسح لأنظمة «التحليل الكهربائي» التجارية أن الشركات في النرويج، وسويسرا، وكندا، وإيطاليا، وألمانيا قد التقت جوهرياً على نفس الكيمياء والأوضاع التشغيلية والكفاءة. ولكن نورسك هيدرو كانت تتقدم قليلاً من حيث الكفاءة، وربما كان ذلك بسبب خبرتها الطويلة. إن إنتاج الهيدروجين بالتحليل الكهربائي يمثل صناعة ناضجة، ومن

الممكن تحسين كفاءتها بحدود 30٪. لكن يبدو أن التصاميم الهندسية لم تتقدم كثيراً منذ خمسين عاماً. وهناك طريقتان للتفاعل مع هذا الأمر، فإما أن تكون هذه فرصة ذهبية لاختراق بحثي، أو أن تكون حذراً من أن المهندسين في خمس دول التقوا حول تصميم واحد.

تشتري المصانع الصغيرة لتوليد الهيدروجين بالتحليل الكهربائي كهرباءها ببساطة من شبكة التجهيز المحلية، أما المصنع الكبير فقد يتطور مع مصدره الكهربائي المستقل. وفي عالم مثالي، أي عالم خال من أخصائيي الاقتصاد، ستمتلك منشأة متكاملة للكهرباء والهيدروجين مناعة للتذبذات في سعر الكهرباء. وستقوم المنشأة المتكاملة على أي حال في أوقات ارتفاع أسعار الكهرباء، باستخدام كهربائها بأسعار أقل من الأسعار السوقية، وذلك لتساعد في كلفة إنتاج الهيدروجين. وقد قام أحد مصانع الألمنيوم خلال أزمة كهرباء كاليفورنيا سنة 2000 ـ 2001، بإقفال مصنع إنتاج الألمنيوم وإعطاء عماله إجازة براتب كامل للبقاء في البيت والقيام ببيع الكهرباء. وقد حققوا أرباحاً أكثر خلال استمرار الأزمة من بيع الكهرباء، مقارنة بما كانوا سيحصلون عليه من بيع الألمنيوم. إن امتلاكك لمصدر تجهيزك هو تأمين على المدى القصير ضد تذبذب الأسعار. أما على المدى البعيد، فسوف لن تُهدر إمكانية ربحك من الكهرباء لتساعد في توفير المنيوم رخيص أو هيدروجين رخيص.

ولما كان بالإمكان خزن الهيدروجين (كغاز مضغوط أو كسائل مبرَّد) كان استخدام طاقة الريح أو الطاقة الشمسية لإنتاجه على وجه التخصيص أمراً مغرياً. إلا أن طاقة الريح والشمس ضمن كل الاعتبارات البديهية، متقطعة، ولا يمكن توقعها بصورة دائمة. وعند كتابة هذه السطور كانت مولدات الكهرباء من الرياح ذات هندسة جيدة، وكانت طاقة التوليد من هذا المصدر تتنامى بنسبة 25٪ سنوياً.

أما توليد الكهرباء من الطاقة الشمسية فليس بتلك الكفاءة بعد في المنشآت واسعة الحجم. وقد أردت عند كتابة هذا الكتاب بناء جهاز عرض لإنتاج الهيدروجين والأوكسجين يزود بالطاقة الشمسية بحدود 60 واط، واكتشفت «مستغرباً» أن الخلايا الشمسية لإنتاج 60 واط تكلف 1000 دولار.

مصادر الهيدروجين الغريبة

تم عبر السنين التحري عن طيف واسع من طرق إنتاج الهيدروجين، فقد تم على سبيل المثال استقصاء تكسير المركبات الكيميائية المحتوية على الهيدروجين (عدا الغاز الطبيعي والفحم) في درجات حرارية عالية. لكن أياً من هذه الطرق لم تصبح ممارسة تجارية. وهناك على لوحة الرسم تصاميم لمفاعل انشطار نووي يعمل بدرجة حرارة 1000°ف وينتج كلاً من الكهرباء والهيدروجين.

أما الأنظمة البايولوجية في الخلايا الحية، والأنظمة البايوكيميائية التي تقلد العمليات الحيوية، فكلاهما مشوّق. فالنظام البايولوجي المثالي يقتنص ضوء الشمس ويؤدي عمله السحري بواسطة الكيمياء الضوئية، ويعطينا الهيدروجين. وقد كانت لي شكوكي دوماً، إذ يتبين أن صنع الميثان أمر يلائم الباكتيريا بصورة أفضل. وأبطال صنع الهيدروجين ذوي المنزلة القديمة بين الأنظمة البايولوجية، هم بضع سلالات من الباكيتريا الأرجوانية، التي يعكس لونها جزيئة غير جزيئة الكلوروفيل الأخضر، تقوم بامتصاص ضوء الشمس. ويرى ركاب الطائرات عند اقترابها من مطار سان فرانسيسكو أحواضاً مساحتها العديد من الأميال المربعة إلى جانب خليج سان فرانسيسكو، وهي ذات لون وردي محبب، يشبه لون الملابس النسئية الداخلية. وتحوي الأحواض ماء بحر يتبخر، وهي طريقة لاستحصال الملح.

وينتج لونها عن الباكتيريا الأرجوانية. وتستمر البحوث، بخاصة في ألمانيا على توليد الهيدروجين من خلال إتاحة المجال للباكتيريا الأرجوانية للعمل على مياه الفضلة الغنية بالعضويات.

خزن الهيدروجين ونقله

إن خزن الهيدروجين كما لاحظنا سابقاً هو أيضاً طريقة لاستغلال الطاقة المتناوبة للشمس والرياح المتقطعة. وفي الوقت عينه، هناك ثلاث طرق سائدة لخزن الهيدروجين: كغاز هيدروجين في خزانات ذات ضغط عالٍ، وكسائل مبرد، أو كمزيج من سائل بارد وهيدروجين صلب. وهناك إضافة إلى ذلك، إمكانية لخزن الهيدروجين من خلال امتصاصه في مادة سائلة أو صلبة. ورغم أن الطريقتين الأوليين هما قيد الاستخدام الآن، إلا أنهما تحتاجان إلى ظروف مُحْكمة، فضغط الخزان يكون عادة بين خمسمائة إلى ألف باوند على الإنش المربع (أي نحو 34,5 إلى 69 ضغط جوي). أما إذا اخترت الهيدروجين المُسيّل فيجب أن تتذكر أني عندما أقول «مبرد» فإني أعني حرارة فوق الصفر المطلق بقليل (أي ـ 487°ف)(*). وسنناقش قضايا السلامة لاحقاً، أما الآن فسنناقش قضايا الهندسة.

إن خزن الهيدروجين كغاز ذي ضغط عال له أفضلية، لكونه مستقرّاً، فبالإمكان ترك السيارة مركونة في مرآب الدار لفترة أسبوع وسيبقى الهيدروجين فيها. والخزان ذو الضغط الأقل مفيد هو الآخر، لكن حجمه سيملأ صندوق السيارة ومجال جلوس الركاب أيضاً.

(*) درجة الصفر المطلق في مقياس سلسيوس (أي المئوي سابقاً) هي (-273,15°) وتساوي على مقياس فهرنهايت (- 459,67°). ودرجة غليان الهيدروجين المسيل هي 20,28° درجة كيلفن، أي درجة فوق الصفر المطلق، وتساوي (- 251,78° س) أو (- 423,17° ف).

والسيارات والشاحنات التي تعمل بالغاز الطبيعي لديها نفس المشكلة. وقد طورت محطات تزويد الغاز الطبيعي العاملة في إيطاليا ونيوزيلندا لفترة تربو على العشرين سنة تقنية مشوقة لتجهيز غاز الضغط العالي، فالقوة اللازمة لكبس الغاز إلى ضغوط عالية جداً كبيرة جداً، مما يعني أنها مكلفة(*)، وعندما تتوقف في محطة للتزود بالغاز الطبيعي ويكون خزان سيارتك فارغاً تقريباً، فمن الهدر البدء بأخذ الغاز من الخزان الذي كبس فيه الغاز إلى أعلى ضغط. نتيجة ذلك، تحتفظ محطة التجهيز بثلاثة خزانات للغاز، ذات ضغط واطئ ومتوسط وعال. وكذلك يفضل استخدام ثلاث مضخات ضاغطة للغاز، فعندما تركن سيارة تشتغل بالغاز الطبيعي لملء خزانها الفارغ، يبدأون باستخدام مضخة الضغط الواطئ، ثم كابسة الضغط المتوسط وينهوا ذلك بكابسة الضغط العالي من خزان الضغط العالي. ويفترض أن تتبع محطات تجهيز الهيدروجين الأسلوب ذاته.

أما الهيدروجين المسيّل، فهو كما ذكرنا بارد، وبارد جداً. وبطبيعة الحال يكون خزان الوقود في المركبة معزولاً. لكن لا يوجد عازل مثالي، فتتسرب الحرارة ببطء إلى الخزان ويبدأ الهيدروجين السائل بالتبخر. وإذا كان خزان الوقود مسدوداً ومحكم الإغلاق وتركت سيارتك في مرأب البيت لأسبوع فستجدها عندما تعود قد انتثرت هي والمرآب في أنحاء الجيرة كلها. لذا استوجب الأمر توفير ممر آمن لتسرب الهيدروجين، أو وسيلة تبريد محمولة في العجلة.

مع تكنولوجيا اليوم، ولتحقيق تعادل بين توفير طاقة لتشغيل

(*) المعروف علمياً أن القوة المطلوبة لكبس الغاز تتناسب مع نسبة الكبس وليس مع مقدار الضغط، أي أن كبس غاز بضغط 2 بار إلى ضغط 20 بار يستهلك قوة أكثر من كبسة من 100 بار، إلى 200 بار لأن نسبة الكبس في الحالة الأولى هي 10 بينما هي في الحالة الثانية 2 فقط.

العجلة بواسطة الهيدروجين عالي الضغط، وبين كلفة استخدام الهيدروجين المسيل، يحدث ذلك عندما يصل الاستهلاك إلى عشرة غالونات من البنزين في اليوم وإذا ما كان أكثر فالأفضل لك استخدام الهيدروجين المسيل. وقد استغربت من كون كمية التقاطع (Crossover) بين الحالتين صغيرة بهذه الدرجة. والمشوّق في الأمر أن محطة شل لتزويد الهيدروجين في أيسلندا تبيع الهيدروجين عالي الضغط، بينما محطة شل المقترحة في طوكيو ستبيع الهيدروجين المسيل.

كان هناك أمل قديم العهد حول نوع من مادة تمتص الهيدروجين ثم تطلقه دون الحاجة إلى ضغط عالٍ أو درجة حرارة واطئة. وبعض المعادن تمتص الهيدروجين فعلاً (فما ادعي أنه اندماج بارد سنة 1989 في جامعة يوتا، بدأ بدراسة لامتصاص معدن البالاديوم للهيدروجين). ولم يُبدِ أيٌّ من خطط الامتصاص المقترحة والعديدة حتى اليوم أي نجاح تجاري.

القضايا البيئية

إن اقتصاداً يعتمد الهيدروجين ويستند إلى هيدروجين قابل للتجديد وغير ملوث هو هدف بيئي ذو جاذبية هائلة. من المهم بالطبع أن نتذكر أن مصادر الهيدروجين وكذلك استخداماته يجب أن لا تكون ملوثة، فعلى سبيل المثال، تضمنت مقالة عن الهيدروجين في مجلة خريجي هارفارد في أوائل سنة 2004 شكلاً يبدو فيه الغاز الطبيعي وهو يدخل المنظومة، ويخرج منها كل من الهيدروجين والكهرباء[3]. وإذا دخل الغز الطبيعي أو الميثان CH_4 إلى المنظومة،

(3) انظر: Craig Lambert, «The Hydrogen - Powered Future,» *Harvard*, vol. 106 (January 2004), pp. 30-35.

فإننا لا نجد مخرجاً لثاني أوكسيد الكاربون. وترسل معظم المصانع الموجودة الآن الكاربون إلى أعالي الجو خلال المدخنة بهيئة ثاني أوكسيد الكاربون، ما يزيد من تراكم هذا الغاز في الهواء.

إن مفاعلة الميثان مع البخار ليس بالخيار الأفضل، لأن الطلب على الغاز الطبيعي في أميركا الشمالية بدأ يتجاوز الكمية المتوافرة، وإذا أصبحت إحدى طرق إنتاج الغاز من بلورات الميثان المائية اقتصادية، فقد يصبح لإنتاج الهيدروجين من الغاز الطبيعي مستقبل. وكما بينا في الفصل الرابع، فإن أي طريقة مغرية لإنتاج الغاز لم تظهر حتى الآن، وبعد عشرين عاماً من اكتشاف ترسبات بلورات الغاز المائية.

أما إنتاج الهيدروجين من الفحم، فهو من الناحية الأخرى أمر ناجح الآن في الصين، وسيكون ناجحاً بيئياً إذا ما قمنا بخزن ثاني أوكسيد الكاربون، أي الناتج العرضي، تحت سطح الأرض بصورة دائمة، أو باستخدامه في عملية استخراج النفط، وهي الطريقة الأفضل. ومما يزيد في الإشكال أن بعض أحواض الفحم تحتوي على كميات ضئيلة من مواد سامة مثل الزئبق أو الزرنيخ، لذا يتوجب على طريقة استخراج الهيدروجين من الفحم تجنب إطلاق هذه المواد إلى البيئة السطحية. وإذا ما تم تجاوز هذه المشاكل، فقد يبدو هناك جانب مشرق، فالولايات المتحدة والعالم بصورة عامة لديهم تجهيزات من الفحم تكفي لبضعة مئات من السنين.

إن إنتاج الهيدروجين من التحليل الكهربائي للماء يكلف في الوقت الحالي ثلاثة أضعاف ما يكلفه الهيدروجين المستخرج من الفحم أو الميثان. وكما بينا سابقاً، فإن الهندسة الجدية لخلايا التحليل الكهربائي تعود إلى خمس وسبعين سنة مضت. لذا، فلا نتأمل سماع شخص من مختبر أبحاث يصرخ فجأة «آها». والأغلب

أن علينا أن نتقبل كفاءة إنتاج الهيدروجين الحالية من خلال التحليل الكهربائي.

إن تقييم الأثر البيئي لا يبدأ من شراء القوة من الشبكة الكهربائية. وإذا أردنا أن يكون الهيدروجين المستخرج من التحليل الكهربائي ناجحاً بيئياً، فيجب أن يكون توسيع منظومة التوليد الكهربائي اللازمة لإنتاجه ناجحاً بيئياً هو الآخر، فإن محطة شل لتزويد الهيدروجين في أيسلندا تستخدم القوة المُولَّدَة من مصادر كهرومائية أو جيوحرارية. ويعود السبب في ذلك إلى أن الطاقة الكهربائية الأيسلندية برمتها هي إما كهرومائية أو جيوحرارية، ويمكن للطاقة النووية وقوة الريح والشمس أن لا تكون ملوثة أيضاً. ولكن ما لا يتوجب فعله هو الحصول على الكهرباء من محطة كهرباء حالية ملوثة تعمل بالفحم، وندّعي بأن مسك الدفاتر البيئي يبدأ بعد أن نشتري الكهرباء.

السلامة

يصيبني القلق أحياناً من أننا نتعلم من التاريخ أكثر مما يجب، فميونيخ (1938) وفيتنام (1964 ـ 73) محفورتان في ذاكرتنا الجماعية كأخطاء يجب أن لا تتكرر. أما حريق منطاد هندينبرغ سنة 1937، فقد علّمنا بأن غاز الهيدروجين خطر بالضرورة وكارثي (ولم تساعده علامة الصليب المعقوف المرسومة على دفّته). ويفيد تحليلان بأننا تعلّمنا درساً مخطوءاً من كارثة هندينبرغ، فاللهيب في الصور الفوتوغرافية المشهورة عن الحادث يظهر الغلاف الخارجي شديد القابلية للاحتراق وهو يحترق. وللأمر حقيقة غريبة: إذ إن لهب مزيج الهيدروجين والهواء غير مرئي تقريباً. وقد علمت عن هذه الحقيقة الغريبة من منجم كورديرو للزئبق في نيفادا، فقد كانت إحدى

إجراءات السلامة في المنجم تتعلق بالفحص المتكرر لبول المستخدمين لاكتشاف المستويات الواطئة من الزئبق. وقد اكتشف مدير المنجم أن تحليل اللهب للزئبق تزداد حساسيته إذا ما استبدل خزانات الغاز الطبيعي بخزانات من الهيدروجين. والضرر الوحيد الناجم عن احتراق الهيدروجين كان بعض الحروق البسيطة لأصابع فنيي المختبر، الذين افترضوا غريزياً حتى بعد تنبيههم عن عدم امكانية رؤية اللهب، أن الملهاب كان مطفأ.

والرؤية المعمّقة الثانية المجترحة من درس الهندينبرغ نأخذها من كتاب نشر سنة 1954 بعنوان *Slide Rule*[4]. ويبقى نيفيل شوت (Nevil Shute) في الذاكرة بفضل قائمة طويلة من الروايات التي كتبها، وبخاصة كتابه التنبُّئي (*On The Beach*)، علماً أن شوت كان في الأصل مهندس تصميم طائرات، وكما ذكّرني كتابه الوحيد غير القصصي، يقود فريق تصميم يقوم ببناء منطاد بريطاني ذي هيكل صلب أخف من الهواء. وواحداً تلو الآخر، سقطت معظم المناطيد الأخرى ذات الهياكل الصلبة وتحطمت. أما منطاد شوت، فقد طار به إلى كندا وعاد دون أن يصاب بأذى (لكنه في الأخير قُطّع وبيع هيكله كألمنيوم خردة). لو كنت قرأت كتاب (*Slide Rule*)، ولم تكن سمعت بالهندينبرغ، لكنت استغربت سبب توقفنا عن بناء المناطيد ذات الهياكل الصلبة.

حملت رحلات أبولو إلى القمر خزانات معزولة للأوكسجين والهيدروجين المسيّلين. واستخدمت خلايا الوقود النشطة لتوليد الكهرباء وإنتاج الماء الذي استخدم للشرب. إنها ترتيبات ذكية، ومع

---

(4) انـــظـــر: Nevil Shute. *Slide Rule: The Autobiography of an Engineer* (London: House of Stratus, 2000).

ذلك، فإن حادثة أبولو 13 حدثت لأن مدفأة كهربائية في خزان الأوكسجين تعطلت في الموضع الذي تعمل فيه، وانفجر الخزان نتيجة ذلك ونسف معه جانباً كاملاً من السفينة الفضائية. وكان يمكن بكل سهولة أن يكون خزان هيدروجين ذلك الذي تتعطل فيه المدفئة، ولو حدث ذلك لكنا قد تعلمنا درساً آخر مشكوكاً فيه.

إن خزن الهيدروجين في خزانات ضغط عال على مركبة شبيه إلى حد ما بخزن الميثان. وقد تكلمنا عن تلك القضية في الفصل الرابع. ولا توجد إلا خبرة قليلة حول مخاطر الهيدروجين المسيل في المركبات الصغيرة. وغاز الهيدروجين بحد ذاته ليس ساماً، وما دام هناك مقدار كافٍ من الأوكسجين موجوداً، فبإمكانك تنفسه بأمان. لكن، على أي حال، أقترح أن تترك قداحة سجائرك في البيت، إذ إن أي مزيج للهيدروجين مع الهواء يحتوي ما بين 4٪ إلى 75٪ من الهيدروجين حجمياً يكون قابلاً للاشتعال الفوري. وتسير موجة اللهب خلال مزيج الهيدروجين مع الهواء بسرعة تبلغ عشرة أقدام بالثانية. وهناك خطر آخر يصاحب الاحتراق، وهو الانفجار، ففي مزيج تبلغ نسبة الهيدروجين فيه ما بين 18 و 60٪ في الهواء، يمكن أن يحدث انفجار: موجة ضغط تنتقل بسرعة ستة آلاف قدم في الثانية. وعليه، فأنت لست بحاجة إلى لهب عار في مرأب يكون الهيدروجين قد تسرب فيه. من الناحية الأخرى، فكِّرْ بالأمر كطريقة للتقليل من عدد مدخني السجائر.

خلايا الوقود

اكتشف تحلل الماء كهربائياً إلى أوكسجين وهيدروجين سنة 1800. وفي سنة 1838، عرض التفاعل المقلوب للتحليل، إذ أعيد ربط الأوكسجين والهيدروجين لتوليد الكهرباء. ولم يجرِ ذلك من

خلال حرق الهيدروجين والأوكسجين ومن ثم استخدام الحرارة لإدارة ماكنة، لذا لم تكن الأداة المستخدمة سنة 1838 محددة بقعدة كارنو للآلات الحرارية. وقد عرفت بعد ذلك باسم خلية الوقود (Fuel Cell). واستمر تطويرها، وكان أول نجاح رئيسي لها هو خلايا وقود أبولو.

كان تخميني الأول لشكل الخلية أن دواخلها ستبدو إلى درجة كبيرة أشبه بأحشاء خلية التحليل الكهربائي. وكان تخميناً مغلوطاً طبعاً، فخلية التحليل الكهربائي تحتوي على الماء (مع محلول هيدروكسيد البوتاسيوم لجعله موصلاً للكهرباء)، وصفائح معدنية مربوطة إلى مصدر كهربائي. تتجمع فقاعات الأوكسجين على الصفيحة المشحونة بالشحنة الموجبة، كما تتجمع فقاعات الهيدروجين على الصفيحة المشحونة بالشحنة السالبة. وكل ما كان عليك فعله هو أن ترتب بعض الأنابيب لتجمع فقاعات الأوكسجين والهيدروجين (بصورة منفصلة) عندما ترتفع إلى السطح. أما في خلية الوقود، فإن الكهرباء تتولّد عندما يلتقي الغاز والماء والصفيحة المعدنية سوية. وما هو داخل خلية الوقود، ليس بالشيء البسيط، فهناك ترتيبات فعالة، لكنك عندما تشتري خلية وقود، فإن المصمم الذكي والمصنع الذي أتقن عمله يتوقعان أن يقبضا ثمن جهودهما. وبإمكانك شراء خلايا وقود بأحجام للعرض وأُخرى يمكن للطلاب تفكيكها[5].

إن تركيبة الأسطح المعدنية في كلا النوعين، أي خلية التحليل

---

(5) هناك خمسة وثلاثون نوعاً مختلفاً من خلايا الوقود المخصصة لعرض عملها ومعها العدد المتعلق بها تباع من قبل: Fuel Cell Store, PO Box 4038, Boulder, CO 80306, http://www.fuelcellstore.com.

الكهربائي، وخلية الوقود، لها تأثير كبير. والبلاتين هو أحسن المعادن لدفع الإلكترونات من السطح المعدني إلى داخل الماء أو لتخرج منه. ويباع البلاتين اعتباراً من آذار/ مارس 2004 بسعر 10000 دولار للبوند الواحد. لذا، إن خلايا التحليل تستخدم نتيجة ذلك صفائح أقل سعراً من الصلب للقطب السالب ومن النيكل (أو المطلية بالنيكل) للقطب الموجب. وخلايا الوقود بحاجة لأي مساعدة يمكن إسداؤها. لذا، فإن بعضها تستخدم طلاء قليل السمك من البلاتين على المعدن الأرخص الموجود تحته.

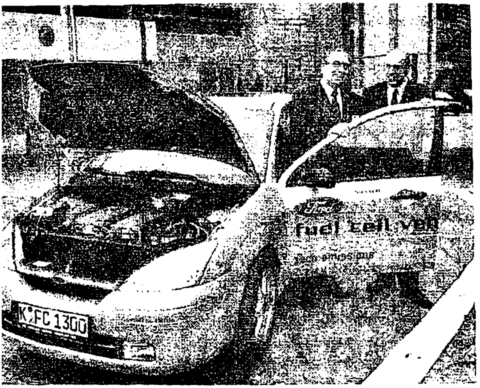
وتنتج أفريقيا الجنوبية وروسيا الجزء الأكبر من البلاتين في العالم. وإذا ما بدا أن البلاتين هو مكون جوهري لخلايا وقود السيارات فستكون هناك أزمة. وتلك هي الأخبار السيئة. لكن الأخبار الجيدة هي أن البلاتين يمكن أن يدوّر.

إن أحد أكبر مستخدمي البلاتين اليوم هي صناعة تكرير النفط التي تستخدمه كعامل حفاز. ويستعاد معظم البلاتين في النهاية. وقد علمت عن تدوير وإعادة استخدام البلاتين عندما طلب مني أن أكون شاهداً خبيراً في قضية في المحاكم بين شركة تصنيع عوامل التحفيز وبين معمل تكرير بلاتين، فعملت ما يعمله معظم الأكاديميين الأقدمين، فقد وظفت جهود طالب دراسات عليا كان له تحكم أفضل في المهارات المطلوبة. وكانت «قضية ـ البلاتين المفتقد» مشوقة. وقد قدمنا شهاداتنا، وحصل جانبنا على تعويض ممتاز من خلال تلك القضية. وأردنا، أنا وطالب الدراسات، أن نكتب عن القضية، لكننا أُخبرنا أن شروط التسوية أجبرت كلا الجانبين على الاحتفاظ بسرية الأدلة، وما استطيع أن أبوح به هو أن معظم البلاتين يعاد استخدامه.

إذا كنت تقود سيارة تعمل بخلايا الوقود، وكنت تنطلق بسرعة

قليلة، فإن كل خلية وقود من النضيدة تولد نحو 0,7 فولت. وإذا أردت أن تتجاوز شاحنة وضغطت على دواسة البنزين، فإن الفولتية ستهبط إلى 0,5 فولت، لكن التيار الكهربائي سيتضاعف ثلاث مرات. وبذلك فإن القوة (وهي حاصل ضرب التيار في الفولتية) ستتضاعف، وستجتاز الشاحنة، لكن الكفاءة ستنخفض. وإذا حاولت استحصال قوة أكبر - لاجتياز سيارة بورش مثلاً، فإن خلية الوقود سوف لا تستطيع أن تحرك الهيدروجين والأوكسجين إلى السطوح الفعالة بالسرعة الكافية.

وتستخدم أبسط أنواع خلايا الوقود الماء مع محلول هيدروكسيد البوتاسيوم بنفس طريقة خلايا التحليل الكهربائي. ومع ذلك، فقد أنتج البحث عن خلايا وقود أكثر كفاءة وأصغر حجماً تصاميم لنحو نصف دزينة من الأنواع، يعمل بعضها بحرارة داخلية تبلغ بضع مئات من الدرجات الفهرنهايتية (ف)، وهذا معناه أنك لن تستطيع القفز إلى مقعد القيادة وتدور السيارة مباشرة في صباح بارد. وهناك أيضاً بحث عن خلايا وقود تعمل على شيء ما أسهل من الهيدروجين حملاً، والميثانول (أو كحول المثيل) هو أحد المرشحين. وأحد الأسواق الممكنة لخلية وقود مقزمة يمكنها أن توفر القوة لحاسوب محمول على طول السفرة من نيويورك إلى طوكيو بالطائرة.



قدّمت شركة فورد آي ج (Ford AG) الألمانية وهي فرع لشركة فورد الأميركية هذه الس
للعرض في شباط/ فبراير 2001. وترى خلايا الوقود العاملة بالهيدروجين في الصناديق ـ
غطاء الماكنة (جوكل فينك (Jockel Finck)، أسوشيتد برس)

يبدو أن أغشية التبادل البروتوني، والتي تعرف أيضاً بأغش
المحلول الكهربائي البلمري، هي الأقرب إلى الوصول إلى مرح
الإنتاج الواسع. تقسّم خلية الوقود إلى خليتين ثانويتين، تغذ
إحداهما بالأوكسجين (أو الأوكسجين مع الهواء)، بينما تغذي الثا
بالهيدروجين. ويوجد بين الخليتين الثانويتين صفيحة من اللدائن تقو
بنقل البروتونات (إيونات الهيدروجين) لكنها لا تنقل الإلكترونات
ويتحلل غاز الهيدروجين على الجانب إلى بروتونات وإلكترونات
وتنتقل البروتونات خلال الغشاء اللدائني، وعبر الخلية مباشرة إلى
جانب الأوكسجين أما الالكترونات، فعليها أن تدور خلال مسلك
يربط بين الصفيحتين في كل من الخلايا الثانوية. إن سريا

الإلكترونات خلال السلك هو القوة الكهربانية التي تستطيع استخدامها. ولدى شركة بالارد باور سيستمز الكندية ترتيبات لبيع خلايا وقود أغشية التبادل البروتوني إلى بضع شركات للاستفادة منها في تصنيع السيارات والحافلات.

يستدعي أحد الاقتراحات استبدال جزء كبير من أسطول سيارات الولايات المتحدة بسيارات تعمل بخلايا الوقود خلال فترة عشرة إلى عشرين سنة. ويتركز اهتمامي أنا شخصياً على المستقبل الأقرب، فتجهيز النفط عالمياً سيعاني من مشاكل لتحقيق الطلب. وحاجتنا هي لخطة تساعدنا على التصرف مع السنين التي ستسبق الزمن الذي تصبح فيه سيارات خلايا الوقود واقعاً.

ولدى المحامين في الغالب طريقة يفسدون فيها المتعة، واقتصاد الهيدروجين ليس بشاذ عن القاعدة[6]، فقانون المسؤولية الحالي ربما يعامل الهيدروجين على أنه يمتلك «خللاً خطيراً» «بسبب عدم إمكانية إلغاء خطورته من خلال ممارسة الحذر المعقول». وقد وافقت الحكومة الاتحادية على تحمل جزء من المسؤولية القانونية في ما يتعلق بالطاقة النووية. وما لم تتم مراجعة قانون الهيدروجين، فمن الأجدر إدراج التأمين عن المسؤولية ككلفة إضافية لاقتصاد الهيدروجين.

هناك شيء وحيد لن يحدث بالتأكيد، ففي كتاب (*The Hydrogen Economy*)، يتخيل جيريمي ريفكن ساحة لركن السيارات مملوءة بسيارات تعمل بالهيدروجين وتكسب المال في ساعات عدم استخدامها من خلال بيع الكهرباء المولد إلى الشبكة. وليس ذلك

---

(6) انظر: Russell Moy, «Liability and the Hydrogen Economy,» *Science*, vol. 301 (2003), p. 47.

نتيجة لنظرية الثيرموديناميكا، بل إنه مسألة هندسة عملية، فقد دفعت لشخص ما ثمن 1,7 فولت لتحصل على الهيدروجين، فهل ستقوم بكسب أي مبلغ عن بيعه له على 0,7 فولت؟

الفصل العاشر
الصورة الشاملة

من الأمراض المهنية التي تصيب الجيولوجيين، تفكيرهم أن مليون سنة ليست إلا برهة صغيرة من الزمن. وطالما كانت الأرض قد تكونت قبل 4500 مليون سنة، فلِمَ نشغل أنفسنا بأي أمر لا يدوم لأقل من مليون سنة. ولديهم أيضاً وهمٌ (ربما يكونوا مخطئين فيه) بأن معظم الزمن الجيولوجي كان مهدوراً. وإليك أربعة أمثلة:

ـ إن العضويات أحادية الخلية تحتل 80٪ من الزمن الجيولوجي، أما النباتات والحيوانات متعددة الخلايا، فلم تظهر إلا في العشرين بالمائة الأخيرة من هذا الزمن.

ـ خلال 90٪ من الزمن، منذ ظهور العضويات متعددة الخلايا كانت حيوانات غير اللبائن هي السائدة.

ـ إن 99,8٪ من زمن اللبائن حدث قبل أن يظهر الإنسان الحديث حسب معطيات علم التشريح[1].

---

(1) إن مفهومَيْ النوع (Genus) والجنس (Species) بالنسبة لأصغر الفروع الثانوية لا تفيد بصورة جيدة، لذا فإن عبارة «الإنسان الحديث تشريحياً» تعني الهياكل العظمية التي يصعب تمييزها عن عظام الإنسان الحالي. وبأرقام مقربة، يمكن القول إن الإنسان الحديث تشريحياً ظهر قبل نحو مائة ألف سنة.

ـ إن 90٪ من زمن وجود الإنسان الحديث تشريحياً انقضى قبل أن يجري تطوير الزراعة وتدجين الحيوان وتدوين التاريخ.

وكان كل جنس من اللبائن في الفترة السينوزووية (Cenozoic Period)، وهو عصر اللبائن، يدوم لنحو مليون سنة. وهذا لا يعني بالضرورة أنك في الذكرى المليون «ستتلقى ضربة عنيفة وتموت» وسوف لن ينجو بذلك أي نوع، فالأنواع في الأغلب تتطور إلى أنواع أخرى، أو تتفرع إلى نوعين. وبدل أن تكون السنين المليون توقعاً بالانقراض ستكون إيماءة جيولوجية فقط على أن «الإنسان العاقل» لا يتوقع له أن يدوم إلى الأبد. وقد يكون قد تبقى لنا تسعمائة ألف سنة. إذن، لنستغلها بتعقل، فنحن من الجانب المشرق مختلفون نوعاً عما كنا عليه سابقاً، فدماغ تشارلز داروين وجد من أين أتى الدماغ وكيف تطور. وطالما فهمنا أصلنا، فسيكون لدينا فرصة جديدة، وقد يدعو البعض هذا مسؤولية جديدة. لكي نسمو متعالين على طريقة التطور المتسمة بالفوضى، والتي أوصلتنا إلى حيث نحن الآن.

لقد شهدت المليون سنة الأخيرة من تاريخ كوكب الأرض والمدعوة بحقبة البليستوسين (Pleistocene) موجات متعددة من زحف وارتداد للعصور الجليدية، وبخاصة حول شمال الأطلسي. وموجات الجليد العظمى ليست ميزة نمطية للعصور الجيولوجية (وكما هو موضح في الفصل الخامس، فإن المجموعة السابقة من موجات تقدم وارتداد الجليد حدثت خلال نهاية العصر البنسلفاني وبداية العصر البرمي، أي قبل نحو 280 إلى 300 مليون سنة). لقد حدثت المراحل الأخيرة من التطور البشري خلال الفترات التي تخللت العصور الجليدية، فنحن إذن «أبناء العصر الجليدي». وكان آخر تقدم جليدي في عصر البليستوسين خلال الفترة قبل ثمانين ألفاً إلى عشرة آلاف سنة.

قضى الإنسان الحديث تشريحياً معظم السنين المائة ألف من

تاريخه يكافح العصر الجليدي. وتُظهر التقنيات الأثرية في فرنسا أن السكن البشري كان على بعد أربعين ميلاً وحسب جنوب حدود المنطقة الجليدية[2].

ورغم أن مخالفة ما تعلمناه في المدارس مربك، إلا أن علينا أن نفعل ذلك بعض الأحيان، فعندما كنت في دراستي الجامعية الأولية، علمونا بأن التطور الداروني يتقدم على أسرعه عندما يكون السكان تحت ضغوط بيئية. وربما يكون العكس هو الصحيح، فأي طفرة غير قاتلة يمكن أن تزدهر عندما يكون التوتر الاجتماعي بسيطاً ويكون الطعام وفيراً ويكون الجو منتظماً. والتباين يبقى: دع الأيام الطيبة تدور.

والخطوة الحاسمة التي حولت أشباه البشر (Hominid) إلى البشر الحديثين ليست واضحة على الإطلاق، فالخصائص التي اعتقدنا أنها مقتصرة على الإنسان بدت لنا واحدة بعد الأخرى موجودة في الحيوانات، وبخاصة قرود الشمبانزي. وقد بينت لنا جاين غودال (Jane Goodall) أن الشمبانزي يقوم عمداً بصنع واستخدام العدد اليدوية. وتستخدم القرود مفردات تبلغ نحو العشرين (وكان قرد رضيع قد رأى ورقة شجر تسقط فأطلق صرخة تحذير تقول «نسر»). وتتعلم مجموعة واسعة من الحيوانات السلوكيات من خلال مراقبة آبائها، وذلك يلائم أحد تعاريف «ثقافة». وقد جرى تعليم قرود الشمبانزي والغوريلا لغة الإشارات من قبل مدربين آدميين. وما يبدو أنهم لم يتعلموه مع ذلك كانت قواعد اللغة وبناء الجمل: أي أسس تنظيم الكلمات في عبارات وجمل مفيدة. وكمثال: عندما رأت (واشو) وهي القردة التي ربيت على استخدام

(2) انظر: Sheldon, Judson «Geological and Geographical Setting (Les Eyzies),» *American School of Prehistoric Research Bulletin*, vol. 30 (1975), pp. 19-26.

لغة الإشارات لأول مرة بطّة تسبح في حوض ماء، أعطت إشارة «طير ماء». وقد اعتقد أصدقاؤها الآدميون أن (واشو) كانت تعني الماء «كصفة». أما ما قد تكون (واشو) قالته فهو اسمان: «ماء» و «طير». (وقد اقترفت أنا نفس الخطأ، فقد كانت هناك لافتة على طريق نيوجرسي السريع تقول «جسر إليزابت كوثال»، وكنت أعرف أن جورج كوثال (George Goethals) كان مهندساً مشهوراً، وفكرت أنه ربما سمى الجسر باسم زوجته. لكن القصة لم تكن رومانسية إلى هذا الحد، فالمخرج كان يؤدي إلى مدينة إليزابت وأيضاً إلى الجسر).

وربما تكون قواعد اللغة، وهو الموضوع الذي كنا جميعاً (تقريباً) نكرهه عندما كنا طلبة، هي الحالة المعرّفة للبشر. ورغم أننا لا نزال ننتظر لنرى ما إذا كنا كبشر مختلفين بالمرتبة أو بالنوع، إلا أننا على وجه التأكيد مختلفون. والحقيقة الجيولوجية ذات الدلالة هي وصولنا المتأخر، فأول زراعة أو تدجين للحيوانات لم يحدثا إلا بعد انقضاء 99,9998٪ من الزمن الجيولوجي.

وفيما كنت أتجول في الكليات لألقي محاضرات عن أزمة النفط العالمية وقدومها، لاحظت أن لا طلاب تقريباً يدرسون الجيولوجيا الحقيقية: تاريخ الأرض وموارد الأرض، فهم يتلقون منهج في الجيولوجيا البيئية والتاريخ البيئي والاقتصاد البيئي، وأي شيء بيئي تريد أن تذكره.

ويتضمن تفهم التفاعلات البيئية بعضاً من أكثر القضايا صعوبة في الهندسة والكيمياء والفيزياء وعلم الحاسوب، والعديد من طلاب البيئة لا يهتمون مع الأسف بالمادة الصعبة، وينحصر اهتمامهم في رغبتهم بالتأثير على السياسة. ويحدث هذا التأكيد في مجموعة واسعة من الكليات. ولدينا في برنستون على سبيل المثال وقفية تدعم «ندوة للطلاب المستجدين في الدراسات البيئية وفي استقصاء القضايا

البيئية، وذلك في المقام الأول من خلال منظور أدبي وفلسفي وأخلاقي وروحي وغيرها من أساليب المنظور الإنساني»(3) لقد رفعنا الجهل العلمي إلى صيغة فنية.

والاحترار الكوني (Global Warming) مثال مشوق، فأنا شخصياً مقتنع بأن الاحترار الكوني حقيقي، وعلينا تقليل الانبعاثات من غاز ثاني أوكسيد الكاربون إلى الجو. ومع ذلك، فهناك افتراض مشوق لا يقوله أحد يرقد تحت النقاش عن الاحترار الكوني، فسنة ماقبل الثورة الصناعية (بحدود سنة 1720)، هي السنة التي نتمنى الرجوع إليها، وهي السنة التي سبقت حرق الفحم على مجال واسع. لكن توقَّفْ لدقيقة، في سنة 1720 كانت أوروبا لا تزال تكافح ما كان يعرف بالعصر الجليدي الصغير (Little Ice Age). كان ذلك العصر قد امتد منذ سنة 1350 حتى سنة 1850 تقريباً. وكانت حكومات المدن الفرنسية قبل سنة 1350 قد امتلكت فائضاً في الإنتاجية أتاح لها بناء كاتدرائيات مثيرة للإعجاب بطريقة لا تصدق. وأرجو ألاّ تعيدوني إلى مناخ سنة 1720 قبل أن تفكروا به. إنني أدّعي في الحقيقة أن عصر الميوسين المتأخر ربما كان ألطف منه بكثير: فمعدل درجة الحرارة كان نفسه تقريباً، لكن القطبين كانا أدفأ، وكانت المنطقة الاستوائية أبرد مما هي عليه اليوم.

وهناك الآن معركة تدور للسيطرة على قلوبنا وعقولنا، فبعض الناصحين يريدوننا أن نفكر بأنفسنا كأمناء على كوكب الأرض، نتحمل واجبات أخلاقية تجاه كافة الأنواع الحياتية. ويقولون إن كل حشرة أم أربع وأربعين (Centipede) صغيرة لها نفس حق العيش والازدهار الذي يتمتع به البشر. أما الرأي البديل، فسيقول إننا قد

---

(3) إنها ندوة هنري دايفيد ثورو (Henry David Thoreau) لطلاب السنة الأولى في الدراسات البيئية ومدرجة في: http://www.princeton.edu/pr/pub/fs/03/73.htm.

ربحنا الأولمبياد الداروينيّ، وإن هذا الكوكب هو كوكبنا ولا نريد أن نعبث به ونجعل حياة الإنسان فيه تعيسة، ولا نريد أيضاً أن نرى عصراً جليدياً جديداً يأتي إلينا. حاول أن تكتب كشف حساب عن الأثر البيئي لزحف جليدي يبلغ سمكه آلاف الأقدام يغطي القارة من خليج هدسون حتى جنوب مدينة نيويورك. إن الخدوش التي سببها الجليد قبل خمسة عشر ألف سنة لا تزال ظاهرة للعيان على الصخور في (سنترال بارك) في مدينة نيويورك.



بعض المناظر الخارجية التي رسمها بيتر بروبغل (Peter Breugel) الأب تذكّر بعصر الجليد الصغير التي دام منذ 1350 حتى 1850. وقد رسم بروبغل هذه الصورة المدعوة (عودة الصيادين *(Return of the Hunters)* سنة 1565. (أيريش ليسنغ (Erich Lessing) / آرت ريسورس (Art Resource)، نيويورك، متحف كنستهيستورشس (Kunsthistorisches Museum)، فينا (Vienna)).

إن المعيار المثالي لتبيان الأثر البيئي هو أن لا يكون هنالك أي

أثر بيئي، وأول شيء: لا تتسبب بأي ضرر. كان البشر قد بدأوا يسببون تغيرات بيئية رئيسية قبل الآف السنين، والأثر الذي تركته الزراعة كان أكبرها، فسرعة التآكل قد أخذ معدلها عبر المنطقة التي يصرف نهر الميسيسيبي مياهها يتضاعف بعد أن أدخلت إليها الزراعة[4]. ومن البداهة أننا نريد تقليص التآكل بسبب الزراعة، وذلك لمصلحتنا الشخصية، فنحن بحاجة إلى ذلك التراب لإنماء محاصيلنا مستقبلاً.

ومن أمثلة التحكم في تآكل التربة: الحراثة حسب تموجات سطح الأرض (Contour Plowing)، والمحاصيل المغطية (Cover Crops)، والفلاحة غير العميقة (Low-tillage Farming)، فنحن لا ننوي العودة إلى العيش بكفاف كصيادين وجامعي غذاء، ولسنا على أهبة العودة إلى عالم غابر مثالي.

والزراعة ليست إلا الأكبر من بين العديد من التحويرات التي أدخلها الإنسان على فيزياء وكيمياء وبايولوجيا سطح الأرض، والتغييرات غير قابلة للعكس، ولا يمكننا العودة إلى حيث بدأنا. وعند النظر إلى ذلك من أعالي ذروة هبرت نرى أن علينا إيجاد طريق إلى عالم صالح للعيش لفترة طويلة.

كانت هناك أمثلة عديدة لتحويرات عالمية غير مخطط لها. إليك مثال ممكن الحدوث لحالة مقصودة من الهندسة الكونية، فقد حدثت خلال المليون سنة الماضية سبع عصور جليدية رئيسية. أفترض أن زحفاً جليدياً جديداً سيبدأ، فإذا ما كنا مقتنعين بأن الجليد القاري الزاحف سيدفن باريس ونيويورك، فما الذي سنفعله؟ إليك ما سنفعله.

---

(4) انظر: Sheldon Judson, Kenneth Deffeyes and Robert Hargraves, *Physical Geology* (Englewood Cliffs, N. J.: Prentice- Hall, 1976), p. 376.

إن تقدم الجليد وتراجعه بدأ قبل نحو مليون سنة، وفي نفس الوقت تقريباً عندما برز برزخ بنما من الماء. وعندما أقفل البرزخ استمرت الرياح التجارية بتبخير الماء من المحيط الأطلسي وإلقائه على الهادي بشكل مطر. وفي مناطق أخرى حول العالم نرى حوض الأطلسي وحوض الهادي ـ الهندي منفصلين بواسطة سلاسل جبلية عالية وصحاري رئيسية... وتبلغ كمية بخار الماء المنقولة عبر بنما حجم نهر الميسيسيبي تقريباً. وبهذا يصبح ماء الأطلسي أكثر ملوحة بينما تخف ملوحة الهادي. وعندما تنتقل مياه الأطلسي المالحة إلى المنطقة الشمالية، وبالأخص إلى القطبية الجنوبية، تصبح أكثر المياه في المحيطات كثافة، وتغور إلى القعر. وفي النهاية تملأ المياه الباردة المالحة الكثيفة التسعين بالمائة السفلى من محيطات العالم، ولا يتبقى سوى العشرة بالمائة العليا من ماء المحيط متاحة لنقل الحرارة من خط الاستواء نحو القطبين. إذن، كيف يمكننا منع تقدم جليدي جديد؟ لقد أدركتها، انقل ماء البحر عبر بنما!

نقوم بحفر قناتين بمستوى سطح البحر عبر البرزخ: وتوجد في جهة المحيط الهادي في بنما موجات مد تبلغ عشرين قدماً في حين لا يوجد مد تقريباً في جهة الأطلسي، ونضع بوابات متحركة على الجانب من جهة الهادي للقناتين تتيح للماء أن يتدفق في إحدى القناتين من الهادي إلى الأطلسي عندما يكون المد عالياً، وأن يتدفق في الأخرى من الأطلسي إلى الهادي عندما يكون الماء بحالة جزر. وستقوم خلال بضع مئات من السنين بإلغاء اختلاف الملوحة بين الأطلسي والهادي. وبهذا ستخف حرارة المنطقة الاستوائية، وستخف برودة القطبين، وسيصبح العالم كله سان دييغو(*). وأنا لا أقول هذا

(*) سان دييغو على ساحل المحيط الهادي جنوب كاليفورنيا، مشهورة باعتدال مناخها طوال السنة.

مقترحاً أن ننفذ هذه الخطة. وما أريد قوله هو أن باستطاعتنا تنفيذ تحويرات مقصودة بخلاف تلك غير المقصودة في أنظمة كرتنا الأرضية الرئيسية.

إن هدف العديد من الجهود البيئية المبذولة اليوم يتمحور حول الحفاظ على التنوع الحيوي. وقد تم تحديد «البقع الساخنة» (Hotspots) للتنوع: والطريقة المؤكدة لاستحصال تمويل لمشروع ما، هي أن تُلحِق بقعة ساخنة بالعنوان. هذا وتحمي قوانين الولايات المتحدة الأنواع المعرضة للحظر وهي حماية يمكن أن تتضمن كلفاً ضخمة، فما هي الأسباب التي نقدمها للحفاظ على التنوع؟ إنني أعترف أن جمال التنوع يغريني بسهولة، فالغطس تحت الماء عند خَيْد مرجاني، أو التمتع بيوم ساحر على سهول «سيرينكيتي» أمور مثيرة بصورة لا تصدق بالنسبة لي. وكان عالم الجينات المبكر تيودوسيوس دوبجانسكي (Theodosius Dobzhansky) قد كتب: «إن الإلمام بالطبيعة الاستوائية هو قبل كل شيء تجربة جمالية كبرى». وتعكس التنوعية العالية في المنطقة الاستوائية جزئياً استقرارية بيئية. وهنالك أعظم تنوع حيوي في مياه بحيرات شرق أفريقيا، لكن الأمر غير واضح بسهولة للسائح، فبحيرة فيكتوريا تحتوى على ثلثمائة نوع مختلف من الأسماك البلطية (Cichlid Fish). (وكنت قد سألت في إحدى سفراتي إلى أفريقيا بعد تناول الغداء «ما هو سمك البلطي؟»، وكانت الإجابة «لقد أكلتَ أحدها للتو». ولم ينوّرني ذلك كثيراً، فقد كان مذاقها شبيهاً بسمك الفَرْخ النهري).

وفي المناطق المرتفعة تتناوب فصول الصيف القصيرة مع فصول شتاء قارصة البرد. ويجب في المنطقة القطبية أن ينمو جيل جديد من البعوض كل سنة. وهناك حشود من البعوض في المنطقة القطبية

لكنها تنتمي إلى ثلاثة أو أربعة أنواع فقط، العديد من الأفراد إنما القليل من الأنواع. ولا يزور المنطقة القطبية للتمتع بالبعوض إلا القليل من السواح.

وهناك بضعة أسباب تقدم للحفاظ على التنوع البايولوجي، أحدها هو الرعاية العامة، فالانفجار السكاني لنوعنا الواحد لا يجب أن يكون السبب في انقراض الآف من الأنواع الأخرى. ويدّعي الجدل الأكثر أنانية أن كافة الأنواع تستحق الحماية، لأننا لا نعرف أبداً أي منها سيعطينا يوماً ما مادة كيميائية تشفي من السرطان أو تصنع لنا كرات غولف أجود. وإذا ما كان ذلك هو الدافع الذي يحركنا، فعلينا أن نقوم بحماية الباكتيريا والفطريات، فهم الكيميائيون الأصليون الطبيعيون والرائعون.

ومن سوء الحظ، أن أحد أسباب التركيز على التنوع هو نوع من الترف الثقافي المحض، فمن السهولة بمكان الرجوع إلى مكتبتنا لنحصي أنواع البعوض أو المتحجرات التي تم الكلام عنه، لكن العمل المضني يكمن في تعداد الأرانب أو الغربان أو السناجب الصامدة، فلسنا مهتمين بقصص نجاح بقاء هذه الأنواع، وعندما تزدهر وتتكاثر أعداد الطيور المهاجرة، مثل الزرازيز، يعتقد غالبيتنا أن الأمر كارثي (وكنا بذلك أكثر صبراً وتحمّلاً من آل كينيدي). ونغرم بالأنواع الخاسرة في حلبة التطور الدارويني، أي تلك الأنواع التي بالكاد بقيت متقدمة على انقراضها. وهناك أخبار جيدة في مضمار إدارة الأنواع المهددة، فقتل الكركدن الأفريقي، لما يفترض أن يحويه قرنه من مميزات منشطة جنسياً، قد تضاءل. والسبب: حبوب الفياغرا.

المستقبل البعيد

الهدف الأول لهذا الكتاب هو البحث فيما ينتظرنا من تمزق في تجهيزات الطاقة خلال الخمس إلى عشر سنين القادمة. لكنني،

لكوني جيولوجيا، لدي فضول غير قابل للشفاء حول الآماد الزمنية الأطول، وهل بإمكاننا أن نستمتع بالتسعمائة ألف سنة المتبقية من الحقبة العمرية للنوع النمطي من اللبائن؟

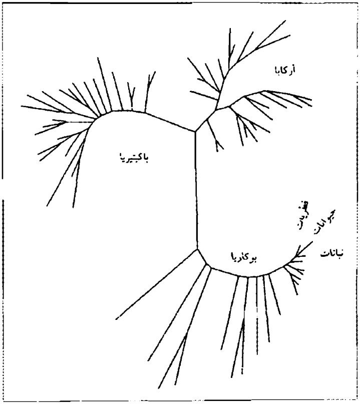
ففي أعماق الحرب الباردة لم يكن من المؤكد أبداً أن يكون لنا مستقبل. وكن كتاب نيفيل شوت (Neville Shute) المعنون (*On The Beach*) الذي سبق ذكره، قد روى لنا ما ستتركه مواجهة شاملة بالأسلحة ـ النووية الحرارية بين الولايات المتحدة والاتحاد السوفياتي. وفي سنة 1967، بعدما اكتشفت جوسلين بيل برونيل (Jocelyn Bell Brunell)، وأنطوني هيويش (Anthony Hewish) النوابض الراديوية الكونية (Pulsars)، التي تبدو مثل نظام ملاحة ثلاثي الأبعاد على مستوى المجرة: وهو شبيه بنظام «لوران» (Loran) في السماء! ابتهجت لبضعة أيام، لأن ذلك كان يعني على الأقل وجود بعض الحضارات التي لم تفجر نفسها بمجرد اكتشافها لعلم الفيزياء أو بعده بقليل. وقد تبين خلال أسبوع، أن هذه النوابض كانت طبيعية، ولم يكن يديرها أيُّ ذكاء فضائي من خارج مجرّتنا.

لم يمض زمن طويل بعد ذلك حتى نُشِرت مقالة عنوانها (*The Zoo Hypothesis*) في مجلة فلكية اسمها **آيكاروس**[5] (*Icarus*). وقد علت المقالة ملاحظة دونها كارل ساغان (Carl Sagan)، الذي كان آنذاك رئيس تحرير آيكاروس. وقد أشار ساغان إلى أن المقالة لا تقع ضمن مجال العلوم، لعدم وجود طريقة ممكنة لنبرهن على أن نظرية حديقة الحيوان باطلة. وعلى الرغم من كل هذا التشويق، قرأت المقالة باهتمام. تقترح فرضية حديقة الحيوان أن الذراع التي تقع فيها مجرتنا ليست إلا محمية طبيعية، وأن المراقبين من خارجها يتجنبون

---

(5) انظر: John Ball, «The Zoo Hypothesis,» *Icarus*, vol. 19 (1973), pp. 347-349.

إرسال أي إشارات راديوية أو أي أدلة أخرى على كونهم يراقبوننا. تخيلت طالب دراسات عليا قادم فجراً إلى العمل صبيحة يوم إثنين لينظر إلى حاسوبه فيرى أن ست حضارات فجّرت نفسها إلى حد الفناء عبر عطلة نهاية الأسبوع. سيعتقد الطالب «أن ذلك في حدود المعدل»، وسيفكر قليلاً ثم يحتفظ بالمعلومات، ثم يبدأ بعدئذ بالقراءة وأقدامه على المنضدة، أي بمجموع أقدامه الخمس.



يتألف التنوع البايولوجي في غالبيته من الحيويات المجهرية (Microorganisms). يمثل طول الخطوط في الشكل الاختلافات بين توالي الجينات في قطعة أساسية من الآر. إن. أي (RNA) التي توجد في كافة الخلايا الحية. وقد جُمعت الخطوط لوضع الحيويات المتشابهة سوية. فالباكتيريا والأركايا تمتلك جدار خلية يحوي داخله ماء على الأغلب مع الخلايا النعالة عائمة داخله بصورة حرة. أما الخلايا في منطقة اليوكاريا (Eukarya)، فلها بنية داخلية مثل النواة والكلوروبلاست والمايتوكوندريا. ولا تمثل النباتات والفطريات والحيوانات من العضويات المرئية إلا جزءاً بسيطاً من التنوع الشامل (جيفري ل. وارد (Jeffrey L. Ward)).

كنتُ بعد انتهاء الحرب الباردة ببرهة ليست بالطويلة، قد توقفت عن رؤية كوابيس حروب نووية ـ حرارية، ولم يكن ذلك بسبب توفير حل للمشكلة، فعلينا أن نبقى حذرين بدرجة استثنائية لنتأكد أن عفريت الأسلحة النووية لا يزال حبيساً في قمقمه، فإذا لم نقم بتفجير أنفسنا ونفيها خارج هذا الكوكب، فما الذي يمكن أن يحدث؟ ما يلي ليس إلا تخمينات خام لما يمكن أن يحدث:

ـ نستطيع أن نكتشف حضارة ثم حضارات أخرى على نجوم بعيدة تحيط بنا، ونحقق اتصالاً معهم، ونصبح جزءاً من مجتمع على مستوى المجرة.

ـ لن نكتشف حضارات متقدمة، لذا نقرر استعمار نظام شمسي قريب. وهناك على متن السفينة الفضائية، مصدر هام للتنوع البشري الجيني: تضم حاوية مثلجة بحجم ربع غالون لعينات من الحيوانات المنوية. أما ملاحي السفينة فمكوّن من مجموعة صغيرة من طبيبات القبالة والتوليد، ويفضل أن يكنّ صغيرات الحجم[6].

ـ أن نتعايش بعمق أكثر مع الأنظمة الحاسوبية، فالسيليكون هو العنصر الذي يلي الكاربون مباشرة في الجدول الدوري الكيميائي، فنحن في طريقنا للتزاوج مع السيليكون.

إن السالف مما ذكرنا ليس بالأهداف، كما هو ليس بالتوصيات، وقد لا يكون صحيحاً أصلاً، إنما ليس هنالك من ضرر في التفكير بأن الحاضر قد يقودنا إلى مكان ما.

---

(6) تحياتي إلى الدكتورة سارة هوغن (Sarah Hougen)، وهي صديقة وطالبة سابقة تعمل في كلية القبالة والتوليد في المدرسة الطبية في جورج تاون وطولها 5 قدم و4 إنش (162 سم تقريباً).

لن يكون النفط أول مورد طبيعي يصبح نادراً، فآخر منجم ينتج الكريولايت (Cryolite) المستخدم لصنع الألمنيوم، استُنفِد الخام منه سنة 1987. ولم يكن ذلك خبراً ذا أهمية، لأن اصطناع الكريولايت أمر سهل، والافتقار إلى النفط أمر مختلف نوعياً، لأننا لسنا مهيئين لتخليق البديل بسرعة. وسيكون هناك مواد أخرى بعد النفط تتجاوز وفرة مصادرها الطلب والحاجة إليها. فهل سيكون هناك تحديد للموارد الطبيعية يطبق على سكان كوكب الأرض؟ هل هناك مادة أخرى حيوية، مصدرها الأرض، ذات موارد محددة، ولا بديل تعويضياً لها؟ أظن أنها ستكون الفوسفات. سموها ذروة ديفيس، فمن خلال التداول والنقاش حول الفوسفات نستطيع أن نرى أن أزمة النفط التي توقعها هابرت ليست إلا واحدة في سلسلة من المحددات الجيولوجية.

فالفوسفات (PO_4 ؛ + + +) تعدن تجارياً من صخور رسوبية تحتوي معدن الأباتايت (Apatite)، وهو نوع من فوسفات الكالسيوم. أكبر منتج للفوسفات والذي يمتلك أكبر احتياطي متبقٍ هو المغرب. وقد وصلتك الرسالة الآن: فالترسبات الرئيسية تجدها مركزة في زوايا مختلفة من العالم، فالولايات المتحدة هي الموضع الثاني وتمتلك مناجم فوسفات كبيرة في فلوريدا وآيداهو. وقد حفر الجزء الأكبر من جزيرة نامور الصغيرة في جزر مارشال لإنتاج الفوسفات.

وهكذا يبدو أن لدينا مصدر للفوسفات القابلة للتعدين سيدوم نحو ثلثمائة سنة[7]، فلِمَ القلق؟ ألن نجد بديلاً حتى ذلك الحين؟

---

(7) انظر: Frederick Wells, *The Long-Run Availability of Phosphorous* (Baltimore: Johns Hopkins Press, 1975), pp. 9-19.

والفوسفات هي العمود الفقري لد دي. أن. آي (D N A) وال آر. أن. آي (R N A)، كما أن «عملة» الطاقة السائدة ضمن الخلايا تعتمد على تحويل ثلاثي فوسفات الأدينوسين (A T P) إلى ثنائي فوسفات الأدينوسين (A D P). وأسناننا وعظامنا تتألف من مادة الأباتايت المعدنية[8]. حاول التعويض عن ذلك. والعنصر التالي تحت عنصر الفوسفور في الجدول الدوري هو الزرنيخ. وهذا ليس بالموضع الواعد للبدء (إذ إن الزرنيخ مادة مسمّمة كما هو معروف).

إن ضآلة قابلية ذوبان الأباتايت تحت أي وضع جيوكيميائي في الماضي أو في الحاضر يحدد كمية الفوسفات المذابة في الماء إلى بضعة أجزاء من المليون، فكيف إذن تعلقنا نحن بالفوسفور بهذا العمق؟ و«نحن» هنا نعني كافة أنواع الحياة من الفيروسات إلى الحيتان الزرقاء. وإليك في هذا الصدد إجابتان محتملتان:

- ليس هناك طريقة كيميائية بديلة لصنع نظام حيوي قابل للحياة، فإذا استطعنا استحضار جراثيم ميتة من المريخ، سنقوم أولاً بإجراء تحاليل بحثاً عن الفوسفور. وإذا ما حققنا اتصالاً مع حضارة نائية بواسطة التلسكوب الراديوي فسنبادرهم بالسؤال: «هل أنتم تتألفون من ذرات لها خمسة عشر بروتوناً؟» (القصد هو الفوسفور).

- كان هناك في موضع ما بيئة ميكروبية على كوكب الأرض تحوي فوسفات يسهل الوصول إليها. وقد استغربت حين وجدت

(8) الرمز الكيميائي للأباتايت هو $Ca_5(OH, F, Cl)(PO_4)$ ويمكن للهيدروكسيد (OH) والفلور (F) والكلور (Cl) داخل القوسين الأولين التعويض أحدهما مكان الآخر. والأباتايت الحاوي على OH غير ذائب في الماء تقريباً. والتعويض عنه بالفلوريد يجعله أقل ذوباناً. وذلك هو سبب منع الماء الحاوي على كميات ضئيلة من الفلوريد نخر الأسنان، فأسناننا مكونة من الأباتايت.

مدخولات في كتالوغ للدقائق الجينية تملأ أعمدة فصل الكيميائيات الحيوية. ورأيت في أسفل القائمة الأباتايت المطحون، فهل إن أصول حياتنا الحالية يعود إلى سطح حبيبات الأباتايت الطبيعي؟

سيكتشف بالطبع أن الإجابة «ليست ضمن أي مما جاء أعلاه» لكن الاستمرار بالتفكير فيها لن يكلف كثيراً. لقد طرق تفكيري استحداث منظمة للدول المصدرة للفوسفات. وعندما يواجه أحفادنا مشكلة نقص الفوسفات سيكررون الإجراء المعهود، ألا وهو تدوير استخدام الفوسفات عندما يكون ذلك ممكناً، وتعويض النقص بواسطة تعدين خامات الفوسفات فقيرة النوعية.

وقد لا يتبين في النهاية أن محدودية الفوسفات هي المحدد الصعب لتكاثر سكان العالم، فالفوسفات هنا مستخدمة كمثال ممكن وحسب. والحقيقة الكامنة هي أن ذروة هابرت لإنتاج النفط ليست إلا واحدة من العديد من المحددات الناتجة عن نقص الموارد.

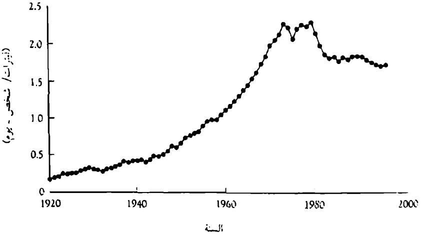
التحكم بعدد السكان

بلغ إنتاج النفط العالمي للفرد الواحد ذروته سنة 1979[9]. ومنذ ذلك الوقت كان العالم ينتج البشر بسرعة تفوق سرعة إنتاجه للنفط. وعلينا في المدى الأبعد أن نجعل عدد السكان مستقراً على مستوى تتمكن كرتنا الأرضية من استيعابه. وسيشجّع استعمار المجرة من زيادة عدد السكان، لكن هناك قليلاً فقط من الرواد من سيمتطي العربات القديمة ليصل بها إلى الأنظمة الشمسية القريبة. وعلى معظم الناس أن يبقوا مرتاحين في بيوتهم. وهناك سؤالان مهمان لا تتوفر

(9) انظر: Albert Bartlett, «Thoughts on Long-Term Energy Supplies: Scientists and the Silent Lie,» *physics Today*, vol. 57 (July 2004), pp. 53-55.

لهما إجابة فيما يخص عدد السكان: كم هو العدد الأقصى؟ ومتى سيصل؟ ولست في الحقيقة مقتنعاً بوجود إجابات شافية لأي من السؤالين. ولن تعتريني الدهشة إذا استوجب الأمر تقلص عدد السكان الحالي خلال مئات السنين القليلة القادمة.

إن طرق التحكم بعدد السكان تأخذ بالطبع موضع جدل خلافي كبير، ويبدو أن أحد الحلول الإنسانية المقبولة هو تحديد النسل، فإذا درّست الطالبات في عمر المراهقة حساب التفاضل والتكامل، فسوف يعملن على إنجاب عدد أقل بكثير من الأطفال. إن حساب التفاضل والتكامل هو طريقة لتحديد النسل مستقبلية. وهذه الطريقة لا تجدي نفعاً مع الصبيان.



أظهر البرت بارتليت (Albert Bartlett) أن رسم إنتاج النفط العالمي للشخص الواحد يبين أن الذروة حدثت خلال عقد السبعينيات. ولم تتماش زيادة الإنتاج بعد ذلك مع نسبة النمو السكاني (جيفري إل. وارد استناداً إلى معلومات من *Physics Today* في تموز 2004).

أسعار الطاقة المستقبلية

السؤال الذي يردّد عالمياً: ماذا يحصل لأسعار النفط؟ وكما أشرت سابقاً: إذا كانت لدي إجابة يعتدُّ بها، ولو جزئياً، لكنت الآن

أمرح وتزداد ثروتي من خلال المساهمة في سوق النفط المستقبلي بدلاً من تأليف الكتب. ويتوقع معظم الاقتصاديين بأن سعر النفط سيرتفع إلى مستوى توازن سعري جديد. ووفقاً لنماذجهم الرياضية، سيتوافق النفط من المصادر المكلفة مع الاستهلاك المنخفض ليتماشيا مع العرض والطلب. وكما بينا في الفصل الثاني، فهناك توقع أكبر لتأرجحات عشوائية في سعر النفط والغاز الطبيعي(*).

إن «سعر النفط المعدل بموجب التضخم المالي» ليس إلا تناقضاً لفظياً من إحدى النواحي، فسعر النفط هو واحد من أسباب التضخم الرئيسية، وأسعار النفط المرتفعة كم رأينا في نهاية السبعينيات تغذي بصورة ارتجاعية أسعار السوق المرتفعة لترفع سعر كل شيء تقريباً، والذي بدوره يولد طلبيات لأجور أعلى. ومن ناحية أخرى، فإن سعر المواد الخام المستخرجة من الأرض يعكس مهارة واجتهاد مجموعة صغيرة من البشر هم جيولوجيو الاستكشاف، والأسعار ستبقى منخفضة كلما استمر اكتشاف ترسبات غنية مماثلة لتلك التي اكتشفت في القرن التاسع عشر. ومثال ذلك ترسبات الرصاص والزنك ذات النوعية الجيدة في ولاية ميسوري، التي يسرت لنا الرصاص بسعر 38 سنت للباوند، والزنك بسعر 54 سنت للباوند فيما ارتحل تعدين النحاس إلى خامات أفقر، وارتفع سعره إلى 1,36 دولار للباوند. إن عدد جيولوجيي الاستكشاف الفعالين في مجالي النفط والمعادن في العالم هو في حدود بضعة آلاف، وربما يقل عن عشرة الآف.

أما طلاب العلوم الطبيعية اليوم فجميعهم يتخصصون في علوم

(*) إن ارتفاع سعر برميل النفط إلى نحو 147 دولار في صيف سنة 2008 لينخفض مع نهاية السنة إلى أقل من 40 دولار يؤيد هذا التوقع.

البيئة أو الإيكولوجيا. وتتعدى هذه القضية الكليات والجامعات، فمعظمنا تعلم كمّاً هائلاً من المعلومات أثناء ممارسة المهنة من زملائنا الأقدمين المتمكنين وذوي الخبرة في الجيولوجيا. وعندما تنقطع هذه الخيوط سيكون هنالك فقد دائم.

المشاكل على المدى القصير

عندما تتجاوز سيارتك حافة جرف لن يفيدك الكبس على الموقّف. ونحن، في الواقع، تجاوزنا حافّة الجرف، فقد توقع دزينة من الكتاب عبر العقدين الماضيين، إضافة إلى تحذيرات م. كينغ هابرت ذات الطبيعة العامة، وصول إنتاج النفط إلى ذروته ليبدأ بانخفاض دائمي خلال العقد 2000 إلى 2010. وقد رفض خبراء آخرون، جيولوجيون واقتصاديون، هذه التوقعات الكئيبة. وعندما تتباين آراء الخبراء، يعتقد الجمهور عادة أن لا معرفة حقيقية موجودة حول لموضوع. ويصبح رد فعل الجمهور «ماذا، الأمر لا يقلقني!».

أشار هابرت إلى أن إسبانيا تعرضت للتخريب عن غير قصد بسبب ذهب العالم الجديد، فقد كانت خلال السنين التي نهبت فيها ثروات العالم الجديد قادرة على بيع الذهب والفضة إلى أقطار أخرى وشراء أي شيء من طعام وعُدَدَ مصنّعة وأشياء فنية. وعند توقف تدفق الذهب والفضة كانت إسبانيا قد فقدت القدرة على إنتاج أي شيء. وفقدت نتيجة ذلك مركزها بصورة دائمية كقوة عالمية. وكان خوف هابرت هو أن النفط والغاز الرخيصين سيعملان على تآكل إمكانيات العالم الصناعي، التصنيعية والزراعية، وبصورة دائمية. ويشير الاقتصاديون في حكمتهم الشاملة إلى أن اقتصاد الولايات المتحدة اليوم أقل اعتمادية على الطاقة وبدرجة كبيرة عما كان الأمر عليه سنة 1980. ويوفر 92٪ من اقتصادنا اليوم خدمات، ولا يفترض

أن للنفط تأثيراً على هذا. وتنتابني الرعشة وأنا أستذكر حديث هابرت عبر منضدة كافتيريا حول إسبانيا، فنطالما قام لعالم ببيعنا النفط مقابل برمجيات مايكروسوفت وأفلام والت ديزني، فنحن في عالم مُترف. ومع سماعي أن اقتصاد خدمات الولايات المتحدة يفوض إلى الهند، أقول إن ذلك يجب أن يصحبه عزف موسيقى «التابس» من شعر بريويت (Prewett) على البوق.

لكن يجب أن تكون هناك جهة ما في موقع ما عند قاعدة الهرم الاقتصادي تزود المواد الأساسية، فالزراعة وتربية المواشي والصيد التجاري للأسماك، وإنماء الغابات، والتعدين وصناعة النفط اليوم قلما تُعار أي أهمية. وفَقَدَ رعاة البقر منزلتهم كأبطال الأفلام السينمائية الكبرى.

إن ذروة الإنتاج العالمي للنفط تشكل مشكلة للعالم، فالناقلات العملاقة تستطيع نقل النفط حول نصف محيط الكرة الأرضية بكلفة دولارين للبرميل. لذا تصبح قضية «من يحصل على النفط؟»، و«من أين؟» قضية نقل ملائم. ويحدد العديد من الناس مشكلة الولايات المتحدة بكمية النفط التي نستوردها من الشرق الأوسط. وهم في ذلك لا يصيبون كبد الحقيقة، فالجزء الأكبر من نفط فنزويلا والمكسيك يُصدَّر إلى الولايات المتحدة، بينما تصدر شمال أفريقيا نفطها إلى أوروبا، ويصدر الشرق الأوسط معظم نفطه إلى اليابان وأوروبا. وهناك سوق فورية حيث تباع فيها حمولات ناقلات كاملة من النفط وتُشترى نقداً في ميناء روتردام، ويمكن إعادة تنظيم أنساق التصدير ـ الاستيراد من خلال بضعة مكالمات هاتفية. ومع اشتداد الشحة في سوق نفط العالم يصبح من يشحن أي نوع من النفط إلى أي مكان مسألة غير ذات أهمية.

سأبحث في الجزء التالي التأثيرات الممكنة على اقتصاد

الولايات المتحدة، وهذا لا يعني أنني أحاول تجنب كوني مواطناً عالمياً صالحاً، فالولايات المتحدة تستهلك 25٪ من النفط العالمي. لذا، فإن ما يحدث في الولايات المتحدة سيؤثر على الصورة العالمية الشاملة.

التصرف الجمعي

يبدو أن ذروة هابرت خيمت علينا، وليس لوقوعها سنة 2003 أو 2005 أهمية تذكر. إنه واقعة، وهي معنا، ولن يكون استمرار العمل على نفس المنوال السابق واحداً من الخيارات. ومن الأصلح أن أكون صادقاً هنا: فالذي نفعله كمجتمع والذي أفعله أنا كفرد كل له مقيداته، فيفترض بي سياسياً أن أصدق أن أفعالي الشخصية يجب أن تصمم لفائدة عموم المجتمع.

وماذا تخمن أنت؟ إنني لا أتقيد بهذا المعيار، ففي العلن سأنادي وأصوت للسياسات التي تخدم الجميع، أما في قرارة أفعالي، فإنني أعترف بميلي لحماية مصالحي.

السياسات العامة

إن السياسات التي يروج لها خلال الحملات السياسية، عدا بعض الاستثناءات، ليست إلا نداءات لا طعم لها وغير محددة لتوخي الكفاءة في استهلاك الطاقة، والتقليل من استهلاك النفط المستورد. وستكون محاولة اقتصاديات الولايات المتحدة، الثبات في حرب مزايدة عالمية لما تبقى من النفط والغاز الطبيعي، شديدة الصعوبة. ونحتاج، بعد أن استهلكنا نحو ثلاثة أرباع نفطنا، إلى شيء ما لنقايضه مع بقية الأقطار كبديل لنفطها وغازها الطبيعي. وإليك البرنامج الذي سوف لا تسمع به:

ـ كانت واحدة من الوقائع الأكثر بطولية في تاريخ الاقتصاد الأميركي قد حدثت نحو سنة 1970. كانت صناعة رقاقات الدوائر المدمجة تنزاح نحو قارة آسيا. لكن شركة أنتل وغيرها استعادت السوق لأكثر الرقاقات تعقيداً وأكثرها ربحية: وهي المعالجات المركزية. وتمثل مكائن الطائرات النفاثة شاهداً آخر، حيث توفر وسائل التصنيع الأميركية الأفضل في التكنولوجيا المتقدمة. وتخمين هوية الكسب التكنولوجي الكبير التالي أمر مستحيل تقريباً، لكننا نحتاج إلى بيئة ترعى الابتكار. والسيارات الأميركية تتحسن نوعيتها واعتماديتها، وهو توجه يجب أن يولى تشجيعاً كبيراً.

ـ تعتبر منظومات الأسلحة مجموعة ثانوية في مبيعات التكنولوجيا المتقدمة. وبيع منظومات الأسلحة المعقدة للتعويض عن استيرادات النفط ذو فائدة محدودة، فإذا كانت المنظومة معقدة إلى درجة لا يستطيع معها من يحصل عليها معرفة استخدامها، فالمحتمل أنها لن تشكل أي خطر. لكن لا تعتمد على ذلك، فصاروخ أرض ـ جو المحمول على الكتف كان يعتبر نظاماً معقداً، إلى أن أشار أحدهم إلى أن تحشية وإطلاق بندقية قديمة من النوع الذي استخدم أبان حرب الاستقلال الأميركية تضمن عدداً أكبر من الخطوات.

ـ إن جملة «الحفاظ على الموارد» ليست ألا تعبيراً ملَطَّفاً للاستغناء عن ذلك المورد، فإذا لم يكن بمقدورك تحمُّل كلفته تقوم بالحفاظ عليه. إنها طريقة الاقتصاديين للتقنين. لكن الأسعار العالية مؤلمة لنا نحن الناس العاديين لسوء الحظ.

ـ تبدو التعليمات التي تبغي زيادة كفاءة استخدام الطاقة جذابة على الورق. وتعطي تعليمات تحسين الكفاءة الجديدة للحكومة مظهراً يوحي بأنها تعمل بشيء ما. لكنها على أي حال ليست شيئاً مقابل لا شيء، فالطلب لعدد أكبر من الأميال من السيارات يجب أن يأخذ

بنظر الاعتبار النظام برمته بما في ذلك تكرير النفط.

ـ ليس بإمكاننا اعتماد برنامج حفر للتخلص من المشكلة، فمنحنى نضوب النفط في الولايات المتحدة قد تجاوز ذروته منذ زمن طويل. وحتى إذا ما أحطت محمية للحياة البرية في المنطقة القطبية بأشد أحلامك حماسة، ويسرتها للاستكشاف، فإن إنتاج الولايات المتحدة سيستمر بالتضاؤل. وكل جزء صغير يعتبر عوناً، لكن المحمية ليست إلا جزءاً صغيراً من المشكلة.

ـ يبلغ استهلاك النفط عالمياً نحو 25 مليار برميل في السنة. لذا، فإن 5 مليارات إضافية من محمية لن تؤخر نضوب النفط عالمياً سوى شهرين أو ثلاث.

ـ لا نستطيع بعد الآن إجراء مباريات يحاول السياسيون أن يزايد أحدهم على الآخر فيها، واعدين بنسب لنمو اقتصادي أعلى. وأنا لا أقدم هذه القائمة لأقول إن الموقف ميؤوس منه، فالذي تعنيه القائمة هو تبدل عميق في طريقة استخدام الطاقة في الولايات المتحدة والعالم كله. ورجائي هو أن نعالج القضية وعيوننا مركزة على الأهداف بعيدة المدى، فالتعدين له أيضاً موقعة في الخطة الكبرى للأشياء، هو يتجاوز كونه حفر رمال القار، وحسب، فقد أصبحت الولايات المتحدة منذ سنة 1990 ثاني أكبر منتج للذهب في العالم. ولو كانت ولاية نيفادا قطراً مستقلاً لكانت ثالث منتج للذهب في العالم. ويتساءل النقاد: «وما هو نفع الذهب؟». والإجابة بديهية: هنالك العديد من الناس في ما وراء البحار يفكرون بأن الذهب يمثل نقوداً، وهم مستعدون أن يبيعوك منتجات صناعية أو شيئاً من احتياطيات النفط المتضائلة مقابل هذه القضبان الذهبية وزن 1000 أونصة.

من ناحية أخرى، بقيت الزراعة الأميركية متشبثة بتنافسيتها على المستوى العالمي، وبقيت أسعار الطاقة العالية وما يتبعها من أسعار عالية للسماد تهديداً للزراعة. ويجب أن تتطور أساليب الفلاحة، لكنني لا أنوي إعادة ولاية آيوا إلى قطعان الجاموس. بل أريد أن أرى الفلاح الأميركي يمثّل قصة نجاح درامية تشابه شركة أنتل.

وليس الاستثمار المباشر في البحوث والتطوير بالخيار الأنسب، وذلك بسبب تجاهلنا للتحذيرات السابقة حول ذروة الإنتاج النفطي العالمي. وليس هناك وقت كافٍ متبقٍّ. علينا بدلاً من ذلك، خلال بضع سنين تالية، الاعتماد على ابتكارات الطاقة، التي لا تتطلب بحوثاً وتطويراً. وفيما يلي قائمة بالخيارات التي تستخدم التكنولوجيات الموجودة.

- يتم الآن تسويق سيارات الديزل عالية الكفاءة التي تحصل على 90 ميلاً في الغالون الواحدة، ومحركات الديزل التي تستخدم التحكم الحاسوبي ولا تنفث الدخان كما كانت في السابق(*).

- محطات قوة كهربائية تعمل بالفحم وفي مواقع يمكن بسهولة اختزان ثاني أوكسيد الكاربون الناتج فيها تحت الأرض.

- إن توربينات الريح الحديثة مهندَسة بطريقة جيدة، ولا يبدو أن رياح وايومنغ ستتوقف عن الهبوب في كاسبر.

- محطات القوة الكهرو ـ نووية: كيف تعلّمت أن أتخلّص من

(*) يضاف إلى التحكم بكمية وتوقيت حقن وقود الديزل بواسطة الحاسوب نوعية زيت الديزل الذي نصت القوانين الأخيرة على تنقيته من الشوائب الكبريتية بصورة شبه تامة، وهذا ما أزال الروائح غير المقبولة من عادم السيارات التي كانت تعتبر عقبة أمام استخدامه الواسع في سيارات الركوب الشخصية وقد وصلت نسبة مبيعات السيارات الشخصية من هذا النوع في بعض أقطار أوروبا إلى 70٪ من السيارات الجديدة، لكنها لا تزال متدنية في أميركا.

القلق وبدأت أعشق الكهرباء الرخيصة.

علينا على وجه التأكيد البحث عن أماكن يمكن فيها للطريقتين أن تعملا معاً. وأكثر نجاح قائم حالياً هو التوليد المزدوج: كحرق الوقود الأحفوري للتوليد الآني للحرارة والكهرباء، والأزواج التعايشية الأخرى هي:

ـ محطة كهرباء وقودها الفحم تقع فوق حقل نفطي بحيث يمكن استخدام ثاني أوكسيد الكربون الناتج لتعزيز إنتاج النفط.

ـ محطة نووية تزود الحرارة والهيدروجين من التحليل الكهربائي لمعالجة رمال النفط الثقيل.

ـ زراعة تنتج كلاً من الطعام ونواتج عرضية قابلة للحرق. ومن أمثلة ذلك: الـ «باغاس» (Bagasse)، أو بقايا قصب السكر بعد اعتصار المادة الحاوية على السكر منه. وحرق الباغاس هنا لن يزيد من ثاني أوكسيد الكاربون الجوي، إذ إن نبات القصب استخلص كاربونة من الجو في فترة مبكرة أثناء موسم النمو.

التصرفات الفردية

دعنا نتجاذب حديثاً خاصاً حول طاولة الطعام، إذ سوف لا نضع في حساباتنا انسياب فتات الثروة إلينا ـ نحن الناس العاديين ـ من الأغنياء، فما سيقطر فتاتاً من الشحة العالمية للطاقة سيكون مؤذياً حقاً. وجلّ ما يمكننا فعله لحماية ما يصيبنا من خير على المستوى الفردي هو خطوات بمستوى كوني أيضاً.

ـ النقل: إن وضع اسمنا على قائمة الانتظار لشراء سيارة بنزين ـ كهرباء هجينة هي الخطوة الأكثر بداهة. يجب عليك التخلص من سفرة العمل اليومية المضنية بالسيارة إذا استطعت إلى ذلك سبيلاً

(فقد انتظرت عشر سنين لأجد بيتاً يبعد شارعين عن الجامعة)، وستصبح هذه الفاكهة والخضر القادمة إلينا من نصف الكرة الجنوبي في غير موسمها غالية الثمن. تعوَّدْ إذن على استخدام المحاصيل المحلية والاعتزاز بها، وستصبح خطوتي الأولى المفضلة خلال مواسم وفرة المنتوج المحلي هي صنع المربيات والمحفوظات البيتية.

ـ الإنارة: دع الجميع يعتادون على إطفاء الأنوار. والنظر إلى المصباح العادي المتوهج وكأنه ليس إلا مدفأة تنتج كميات قليلة من الضياء كناتج جانبي. تحول إلى الإنارة بمصابيح النيون الرخيصة، وانتظر وصول الإضاءة بواسطة (LED) (الدايود المشع للضوء) إلى الأسواق.

ـ التدفئة وتكييف الهواء: يتساوى النفط والغاز الطبيعي من حيث مردودهما الحراري سعرياً ولا يوجد لدي تفضيل قوي لأي منهما. والغاز الطبيعي بداهة هو الأنظف، لكننا نتكلم عن تكتيك البقاء. بالنسبة لمعدات تكييف الهواء، فالمتوفر تجارياً منها كلها كهربائي برمته، وأكبر ربحية متوخاة من المعدات الحالية هو الحصول على استخدام أمثل للهواء الخارجي. فهناك مدى مريح لدرجات الحرارة والرطوبة يشعر به غالبية الناس، فاليوم الصيفي المريح هو اليوم الذي تستطيع أن تبقي النوافذ فيه مفتوحة طوال الليل ثم تغلقها بعد الفطور، وتستمر دون تشغيل جهاز التكييف لحين انقضاء ساعات بعد الظهر الأولى. وأسوأ الخاسرين في هذا المجال سكان نيوجرسي: إذ إن درجة الحرارة تكون ملائمة، لكن الرطوبة النسبية تبلغ 99٪.

ـ هناك صنفان من مراوح التفريغ من حيث طريقة تركيبها، فالنوع الصغير يطرد الهواء الذي اكتسب حرارته من السطح من خلال العليّة. أما النوع الكبير فيعمل من خلال الشبابيك المفتوحة، وذلك

من خلال طرد الهواء الساخن من الجزء الأعلى من غرفة المعيشة. وكلا النوعين ذو فائدة. ويجب عليك أن تحسن طريقة العزل في بيتك حتى إن لم يكن الرئيس كارتر (أو من سبقه) قد أقنعوك بذلك.

ـ ويمكن لأي شخص مصاب برهاب نقص الطاقة الخطير تعويض ما تركته سنة 1980 من نقص، ويشرع ببناء دار فائقة العزل الحراري، مدفأة شمسياً، ومسقفة بالتربة والأعشاب. ولكي تبدي فهماً معمّقاً للآتي من الأيام، ابنِ موقفاً للدراجات بدل مرأب للسيارة.

أما بالنسبة للجانب الاستثماري، فليس هناك العديد من التكتيكات البديهية، فاختر لنفسك أحد الأسهم من خلال أي رمي زهر على قائمة الأسهم المكتوبة بالخط الناعم في إحدى الصحف اليومية، أو قم باستشارة الاختصاصي الاقتصادي في منطقتك.

والطيران على وجه الخصوص معرّض لمجازفة في مرحلة تقلص موارد الطاقة. فالخطوط الجوية، وبُناة الطائرات العسكرية والمدنية، ومصنعو الآلات المحركة النفاثة، سيواجهون طلبيات أقل إذا ما ارتفعت أسعار النفط. وكانت الطائرات المزودة بوقود هيدروجيني تجريبي قد اختبرت منذ عشرينيات القرن الماضي. لكن يبدو أن الوقود المدعو JP-4، وهو منتوج شبيه بالكيروسين ومقطّر من النفط الخام، يستمرّ سائداً خلال السنين العشر القادمة. وقد يحرز مصنعو محركات الطائرات، وهم جنرال إلكتريك، وبرات آند ويتني، في الولايات المتحدة الأميركية، ورولس رويس في بريطانيا، تقدماً قبل غيرهم. والعامل الأكبر في تحديد كفاءة المحرك النفاث هو نسبة الانضغاط، أي الضغط داخل غرفة الاحتراق مقسوماً على ضغط الهواء الخارجي.

الماشية الوفيرة منذ زمن قبل ذروة الإنتاج النفطي. والمطلوب الإنساني البديهي هو توفير الأسمدة بأسعار معقولة للعالم الثالث.

وتبدو الزراعة والألمنيوم والطيران كأنها بداية الأبجدية، فما هي الصناعات الأخرى المهددة ما بين صناعة الطيران والكيمياء التخميرية؟ وأي منها ستزدهر؟ إنني ببساطة لا أدري، لكن الاستفادة من المنظور من على ذروة هابرت يساعد في الإجابة على السؤال.

استثمارات شخصية

قال ليندون جونسون في واحدة من المواقف الصعبة في رئاسته: «إنني مثل أرنب بري في عاصفة من البَرَد، مسمّر في موضعي لأتلقاها»، فإذا ما كانت مهنتك قد تلاشت، وتمويل تقاعدك قد اختفى، ولم تتمكن من الحصول إلا على مهنة بالحد الأدنى للراتب، فإنك تستحق تعاطفي، فأنت مسمّر وتتلقاها. أما لأولئك الأكثر حظاً، فهناك خيارات يمكن اتباعها، منها:

- الافتراض الأول هو أن النظام السياسي الأميركي يبقى على ما هو عليه. وإذا لم تعتقد بذلك فستقوم بشراء البنادق القتالية وتختزن احتياطياً «كميات» من الذخيرة. أما إنا فلست من ذلك النوع الذي يروم البقاء مهما كان الثمن.

- والافتراض الثاني هو أن الاقتصاد الأميركي سيستمر في فعاليته. وقد سمعت العديد من السيناريوات عن الانهيار القريب للاقتصاد. وتنتهي كلها بقولهم «لذا، فالأحسن لك أن تشتري الذهب». ويفترض أن الذهب هو الغاية في الأمور النقدية، وبخاصة إذا لم يكن في صندوق الأمانات العائد لك عندما تقفل كافة المصارف أبوابها. ولست أيضاً من هواة الذهب، وإذا ما قدر لأسعار الطاقة أن يزداد عدم استقرارها باستمرار، فقد تصبح الملكية المباشرة

لموارد الطاقة جذابة. وكان أحد طلابي قد قام خلال الأزمة النفطية في نهاية السبعينيات بشراء كمية من الخشب مع بضعة آيكرات من أراضي الغابات قاصداً الحصول على ما يكفي من الخشب كل سنة لتدفئة بيته. واعتقدت أن فكرته هذه ممتازة، إلى حين بدأت التحديدات على حرق الخشب في المدافئ بسبب التلوث المحلي للهواء.

إن شراء بئر نفطية منتجة عملية تتسم بالفوضى فعلياً وتشبيهياً. كنت أعتقد أن تسجيل سيارة واستحصال تأمين لها في نيوجرسي أمراً سيئاً بما فيه الكفاية. إلا أن كونك منتجاً شرعياً للنفط في معظم الولايات أمر معقد بدرجة أكبر جداً. إن احتكارات الموارد (Resource trusts) التي سنتكلم عنها أدناه ما هي إلا طريقة غير مباشرة لشراء آبار منتجة للغاز والنفط.

إن شراء حصة في شركة نفطية من خلال شراء أسهمها يدخلك في منافسة صعبة مع مشترين آخرين. وتنشر (*Oil & Gas Journal*) كل خريف الاحتياطيات التي تملكها شركات النفط والغاز الأميركية. وبعد دقائق، وربما ثوانٍ من ظهور أرقام الاحتياطي لهذه المجلة في النسخة الإلكترونية على الخط، تظهر رموز المتاجرة للشركات المسعرة واطئاً على شاشات حواسيب المتاجرين في وول ستريت. ويحاول المتاجرون فقط على البقاء في مقدمة الاندماجات وفرق الاستحواذ التي تبحث عن الشركات المقيّمة أوطأ مما تستحق. ولست بمتمكن من التنافس قباله موارد هؤلاء. وما استقر رأيي عليه هو احتكار للريع. وهناك على الأقل عشرون احتكاراً للريع معروضة في البورصات في الولايات المتحدة. وكانت احتكارات الريع في هيئتها الأصلية قد قامت بشراء حقوق التعدين من مُلاكها الأصليين، وهذه عادة تبلغ ثُمن أو ثلاثة من ستة عشر من سعر النفط والغاز

المنتج. وإضافة إلى ذلك قام بعض المنتجين بتحويل أجزاء من حصصهم إلى احتكارات للريع كطريقة لتأمين تدفق دخلهم المستقبلي. هناك لدى احتكار الريع مستخدم واحد فقط، وهو عادة سيدة تستلم الصكوك وتحرر صكوكاً أخرى. وتمنع بنود إجازة إنشاء الاحتكار من هدر أموالها في حفر آبار غير منتجة. وحصص امتلاك أسهم احتكارات الريع تباع وتشترى، والبعض منها في بورصة نيويورك. واتجاه أسعار هذه الأسهم يتبع السعر السوقي للنفط والغاز، أما المردود السنوي فيميل إلى حوالى 7 أو 8٪ من سعر السهم. وهناك بعض المميزات الضريبية الصغيرة لامتلاك أسهم احتكارات الريع في الولايات المتحدة. وكما علمت، فإن هذه المميزات أكبر في كندا.

الاستنتاجات

إن استمرارية عالم الأعمال على المنوال الذي كان عليه ليس مضموناً. والتخبط المشوش ليس بالدواء الشافي. وسواء أحببنا ذلك أم لم نحبه فستكون هناك إعادة تنظيم كبرى في اقتصاديات العالم.

وسيكون التنظيم الجديد أكثر منهجية فيما لو أنتجنا تصميماً لمجتمع تكبحه ندرة الموارد. وسنكون عند ذلك بحاجة إلى مسلك لا تعتوره المآسي ليوصلنا من موضعنا الحالي إلى الموضع الذي تم تصميمه. ومرحبا بعالم مابعد هابرت، أو عالم مابعد النفط.

استخراج ثانوي (للنفط) (Secondary Recovery): يندفع النفط في غالبية الحقول المكتشفة حديثاً تلقائياً إلى السطح بفعل الضغط المكمني. بعد فترة من الإنتاج بهذه الطريقة يتناقص الضغط داخل المكمن، فيستوجب الأمر استخدام وسائل مساعِدة لاستخراج النفط. وتدعى هذه المرحلة بمرحلة الاستخراج الثانوي. والتقنيات المستخدمة قد تشمل المضخات الخارجية أو المضخات الكهربائية الغاطسة. وقد تستخدم طرق لزيادة الضغط في المكمن بحقن غاز ما. وقد يكون ذلك هو الغاز المصاحب الذي يفصل من النفط المستخرج أو غاز ثاني أوكسيد الكاربون أو غيره. وكذلك قد يضخ الماء في المكمن لهذا الغرض. ويمكن باستخدام وسائل الاستخراج الثانوي استخراج ما يراوح بين 30 و50٪ من النفط الموجود في المكمن.

استخراج معزز (للنفط) (Enhanced Recovery): يهدف الاستخراج المعزز للنفط إلى أساليب أكثر تقدماً وفعالية من أساليب الاستخراج الثانوي، لزيادة نسبة النفط المستخرج والتي تصل بهذه الأساليب إلى حدود 65٪ من النفط الموجود في المكمن. وتشمل أساليب الاستخراج المعزز حقن البخار الدوري أو (الإغراق بالبخار)

بواسطة الحقن المستمر للبخار أو استخدام الكيميائيات من النوع الذي يقلل لزوجة النفط ويسهل اندفاعه إلى سطح الأرض. وتشمل كذلك الإغراق بالنار من خلال حقن الأوكسجين أو الهواء وتوليد عملية اشتعال داخل المكمن بشكل جبهة نارية تسخن النفط وتزيد ضغط المكمن في نفس الوقت، وكل ذلك يساعد في استخراج كميات إضافية من النفط.

اندماج نووي (Nuclear Fusion): هو عملية ارتباط نوى مختلفة لذرات عناصر خفيفة لتشكل نوى عناصر أثقل، ويصحب ذلك عادة إطلاق أو امتصاص طاقة. ويحدث إطلاق الطاقة عند اندماج نوى العناصر الخفيفة (ذات الوزن الذري أقل من الحديد)، بينما تحتاج النوى الأثقل عند اندماجها إلى امتصاص طاقة. ويحدث الاندماج النووي طبيعياً في النجوم، ومنها الشمس، مما يطلق كميات هائلة من الطاقة (حرارة وضوء وإشعاع). وأبسط حالات الاندماج تحدث بين ذرات الهيدروجين، فقد يكون ذلك بين نواتي ديوتيريوم (هيدروجين ثقيل تحتوي ذراته على بروتون ونيوترون) لتوليد هيليوم وإطلاق نيوترون وطاقة، أو لتوليد هيليوم وهيدروجين عادة مع طاقة، كما قد يحدث بين نواة ديوتيريوم وأخرى لنتريتيوم (هيدروجين تحوي نواته على بروتون ونيوترونين) ليعطي هيليوم ثقيل مع قدر أكبر من الطاقة.

ورغم أن إحداث اندماج نووي غير مسيطر عليه (بشكل قنبلة هيدروجينية، أو ما يدعى «تفاعل حراري نووي») قد جرى عملياً، إلا أن الاندماج النووي المسيطر عليه (لغرض استحصال الطاقة منه ولتوليد الكهرباء) لا يزال عصياً على العلماء منذ أن بدأوا بحوثهم عليه قبل ستة عقود. ويعتبر عند نجاحه مصدراً لطاقة نظيفة لانهائية.

انشطار نووي (Nuclear Fission): هو عملية شطر نواة ذرة ثقيلة

(مثل اليورانيوم) إلى شظايا أصغر حجماً. وهذه الشظايا، أو نواتج الانشطار هي عادة نوى لعناصر أخرى أخف. وينتج عن الانشطار أيضاً إطلاق نيوترونين أو ثلاثة بصورة حرة. ومجموع كتل الشظايا يقل عن كتلة المادة المنشطرة بقليل، والفرق هو كتلة المادة التي تحولت إلى طاقة في هذا الانشطار والتي تستغل إما لتوليد الطاقة الكهربائية أو عند إطلاقها بصورة فجائية كانفجار نووي. ويمكن للانشطار أن يحدث عندما تقذف نوى العناصر الثقيلة بنيوترونات، كما قد يحدث ذاتياً في نوى بعض النظائر غير المستقرة إشعاعياً.

بلورات الغاز المائية (Gas Hydrates): هي صنف من المواد البلورية الصلبة تتشكل من جزيئات من نوع معين (الجزيئات الضيف) داخل الفراغات بين جزيئات شبكة بلورية تتألف من جزيئات مادة أخرى (الجزيئات المضيِّفة). والجزيئات الضيف ضرورية لدعم الفراغات. والارتباط بين النوعين فيزيائي وليس كيميائياً، أي أن المادتين لا تتحدان كيميائياً لتشكيل مركب. وموضوع البحث في هذا الكتاب هو البلورات المائية (الجزيئات المضيِّفة هي جزيئات الماء) التي تحوي الغاز الطبيعي (الجزيئات الضيف) حيث يمكن أن تكون الجزيئات الضيف واحداً من عديد من الغازات عدا الميثان. وتوجد بلورات الغاز الطبيعي تحت الضغط وفي درجات حرارية منخفضة (أعلى قليلاً من درجة تجمد الماء). وهناك بلورات من هذا النوع تحت الأرض، كما في ألاسكا وسيبيريا الروسية، كما اكتشفت كميات هائلة منها على قاع البحر وعلى أعماق متوسطة، ويعتقد أن كمياتها، وخاصة في قاع المحيطات، كفيلة بتزويد الطاقة للعالم لقرون طويلة، علما إنه لا توجد طريقة عملية لاستخلاص الغاز منها حتى الآن.

تحفيز (Catalysis): التحفيز هو عملية تسريع (أو إبطاء) سرعة

التفاعل الكيميائي بواسطة مادة كيميائية تعرف بالحفاز (Catalyst) وتختلف المادة الحفازة عن بقية المواد المشاركة في العملية الكيميائية بأنها لا تستهلك في التفاعل. وقد يشارك العامل الحفاز في عدد من التحولات الكيميائية ويدعى العامل الحفاز المسرع للتفاعل بالحفاز الإيجابي، كما يدعى الذي يبطئ التفاعل بالعامل الحفاز السلبي. وهناك مواد تزيد من فعالية العوامل الحفازة، وتدعى عوامل الاستحثاث، ومواد توقف فعالية العامل الحفاز وتدعى مثبطات العامل الحفاز.

وتستخدم العوامل الحفازة في الغالبية العظمى من عمليات المعالجة الكيميائية الصناعية أو الغذائية لأنها تقصر مدة التفاعل وكمية الطاقة المطلوبة لتنفيذ التفاعل. والإنزيمات في الجسم البشري وفي بقية العضويات مواد حفازة بايولوجية تساعد في كافة عمليات الهضم والأيض وعمليات التحول الكيميائي في الجسم.

تخصيب اليورانيوم (Uranium Enrichment): يتألف اليورانيوم الطبيعي من نظيرين، هما: U_{235}، ويشكل سبعة أجزاء بالألف من كتلة العنصر، وU_{238}، وهو مجمل الجزء المتبقي تقريباً. والنظير الأول هو نظير غير مستقر إشعاعياً ويسهل شطر نواته بقذفه بالنيوترونات، كما أنه عند وجود كتلة معينة منه تدعى الكتلة الحرجة، يصبح فيه كمٌّ كاف من النيوترونات، من انحلال ذراته، ليولد تفاعلاً انشطارياً متسلسلاً. وهدف التخصيب هو زيادة نسبة U_{235} في اليورانيوم. وفصل النظائر عملية ليست بالسهلة، ولا يمكن إجراؤها كيميائياً، لتشابه سلوك النظيرين كيميائياً. لذا، يتم اللجوء إلى الطرق الفيزيائية، ومنها طريقة التنافذ، إذ يكبس اليورانيوم بحالة غازية (سادس فلورايد اليورانيوم) عبر غشاء ذي نوعية معينة يسمح بمرور كمية أكبر من أحد النظيرين. وقد تُكرَّر العملية مئات المرات

لحين الوصول إلى درجة التخصيب المطلوبة. ويمكن إجراء التخصيب بواسطة النبذ بأجهزة الطرد المركزي فائقة السرعة، أو بواسطة حرف مسار جزيئات اليورانيوم الغازي في مجال كهرومغناطيسي، أو بواسطة إمراره في فوهة مزودة بشفرة مثبتة بزاوية خاصة عبر تدفق الغاز.

تقييم الأثر البيئي ((Environmental Impact Assessment (EIA)): هي دراسة تقيّم فيها التأثيرات التي يمكن أن تحدث ـ سلبية كانت أم إيجابية ـ بسبب مشروع مقترح للتنفيذ. وهدف الدراسة هو تمكين متخذي القرار من السير قدماً في المشروع أو إيقافه أو تحويره لتلافي بعض الآثار غير المرغوبة. ويعرِّف (الاتحاد الدولي لتقييم الأثر) هذه الفعالية بأنها «عملية تشخيص وتوقع وتقييم ومعالجة الآثار الحيوية الفيزيائية والاجتماعية وأي آثار أخرى ذات علاقة بمقترحات التطوير قبل اتخاذ أي قرارات أو تعهدات رئيسية».

خلية وقود (Fuel Cell): هي أداة تحول الطاقة الكيميائية إلى طاقة كهربائية. وهناك عدد من أنواع خلايا الوقود تستخدم كل منها مواد كيميائية مختلفة. وعادة ما تحوي الخلية وقوداً (على الجهة الموجبة) ومادة مؤكسدة (على الجهة السالبة) تتفاعلان بوجود محلول إلكتروليتي. ويمكن تلقيم المواد المتفاعلة إلى الخلية، وستفرز منها نواتج التفاعل والطاقة الكهربائية بينما يبقى المحلول الإلكتروليتي في الخلية.

رمال قيرية (Tar Sands): هي مزيج من الرمل والطين والماء ومادة قيرية. والقير هو مادة نفطية لزجة ثقيلة. والرمال القيرية واحدة من المصادر غير التقليدية للنفط ويجري تعدين الرمال الموجودة عادة على سطح الأرض أو تحت السطح بأعماق قليلة، وتُفصل المادة القيرية عن الرمل والطين ثم تجري معالجة القير لتحسين نوعيته

وتحويله إلى مادة أقل لزوجة يسهل دفعها في الأنابيب النفطية إلى مصافي النفط.

سجّيل نفطي (Oil Shale): السجّيل النفطي هي أيّ مادة صخرية رسوبية تحوي مادة قيرية صلبة (وتدعى هذه المادة الكيروجين (Kerogen)). تطلق هذه المادة الشبيهة بالنفط من الصخر عند تسخينه ويتم ذلك عادة في منشآت ذات معدات خاصة تلقّم بالصخر بعد تعدينه وتكسيره إلى حجم مناسب. ويجري الآن تطوير طريقة لتعدين السجّيل في موقعه وذلك باصطناع جدار مجمد على شكل حلقي وتسخين المنطقة داخله بواسطة مسخنات كهربائية ولمدة طويلة بحيث تطلق المادة النفطية من الصخر ليتم استخراجها من بئر/ آبار تقع داخل المنطقة.

غازات الدفيئة (Greenhouse Gases): غاز الدفيئة هو مركب كيميائي غازي يتواجد في جو الأرض ويتيح لضوء الشمس دخول جو الأرض بحرية. وعندما يصطدم ضوء الشمس بسطح الأرض ينعكس البعض منه نحو الفضاء بصورة أشعة تحت الحمراء (أو حرارة). وتتصف غازات الدفيئة بقابليتها على امتصاص هذه الحرارة وإبقائها في جو الأرض. ومن غازات الدفيئة الموجودة في جو الأرض الطبيعي بخار الماء وثاني أوكسيد الكاربون والميثان وأوكسيد النتروز. لكن تركيز هذه الغازات قد تغيره الفعاليات الصناعية، كما قد ينجم عن هذه الفعاليات أيضاً غازات دفيئة من أنواع أخرى. ويسبب حرق منتجات الوقود الأحفوري (وبخاصة الفحم الحجري) نحو 75٪ من الانبعاثات الجديدة لغازات الدفيئة في العالم اليوم.

مكمن نفطي (Oil Reservoir): هو تجمع للنفط الخام أو النفط الخام والغاز في صخور مسامية تحت سطح الأرض. ويتميز بوجود نوع كتيم من الصخر، كقبة أو جزء علوي فيه، يمنع تسرب النفط أو

الغاز إلى الأعلى. ويكون النفط عادة طافياً فوق طبقة من المياه الجوفية في المكمن.

نفايات مشعة (Radioactive Waste): هي المخلفات التي تحتوي على عناصر كيميائية مشعة، مما ليس لها أي فائدة عملية. وهي عادة نواتج عمليات نووية، كالانشطار النووي. ومعظم هذه النفايات ذات مستوى إشعاعي واطئ مما يعني أنها تحتوي على مستويات واطئة للفعالية الإشعاعية في وحدة الحجم أو وحدة الكتلة. ويتألف معظم هذا النوع من النفايات من ألبسة واقية فيها بعض التلوث الإشعاعي لكنه خطر إذا ما تلوث به جسم الإنسان أو امتزج بطعامه أو لامس جسده أو دخل جهازه التنفسي. أما النفايات عالية الإشعاع، فمعظمها يتألف من قضبان الوقود أو أي مواد أخرى مشعة في المفاعلات النووية. وتتناقص كمية الإشعاع المنبعث من هذه المواد عادة مع مرور الزمن، لكن التناقص يتباين اعتماداً على نوع العنصر والنظير المشع وقد يتناقص بسرعة أو قد يستغرق آلاف السنين. ويقرر عمر النصف الفيزيائي للمادة المشعة سرعة تناقص هذا الإشعاع. وعمر النصف الفيزيائي للمادة هي الفترة الزمنية المنقضية لحين هبوط شدة الإشعاع المنبعث إلى النصف. وهناك في كافة الدول تشريعات حول كيفية حفظ، ومعالجة، وطرق التخلص من النفايات المشعة نظراً لخطورتها على الإنسان والكائنات الحية الأخرى.

يورانيوم منضّب (Depleted Uranium): يحتوي اليورانيوم في مصادره الطبيعية على 99,27٪ من النظير U_{238}، وعلى 0,0055٪ من النظير U_{234}، وعلى 0,72٪ من النظير U_{235} المشع. والنوع الأخير يستخدم عند تركيزه في مفاعلات توليد الكهرباء النووية وفي الأسلحة النووية. ويجري ذلك من خلال ما يدعى بعملية التخصيب. أما

المنتوج الثانوي لهذه العملية فهو ما يدعى اليورانيوم المنضب (أو المستنفد)، وهو يحوي أقل من ثلث كمية U_{235} الموجودة في اليورانيوم الطبيعي، لكن اشعاعيته تبلغ نحو 60٪ من اليورانيوم الطبيعي، نظراً لبقاء U_{234} على ضآلة كميته فيه، وهو مسؤول عن نصف كمية إشعاع اليورانيوم الطبيعي.

ويستفاد من اليورانيوم المنضب في عدد من الاستخدامات المدنية، مستغلين وزنه النوعي العالي (19,1 غم/ سم^3) كما يستخدم كعتاد حربي. ويمكن عند استنشاق ذرات هذا العتاد الذي ينتشر في الهواء نتيجة الحرارة الهائلة المتولدة عند الانفجار، أو عند اختلاطها بالطعام أن تسبب العديد من الأمراض للبشر نتيجة سمية المادة، إضافة إلى تأثيراتها الإشعاعية، كما تسبب أيضاً تشوهات خلقية لدى الجيل التالي نتيجة إصابة الخلايا التناسلية لدى الأبوين.

ثبت المصطلحات

إحاثة (علم)/ علم المتحجرات	Paleontology
احتياطي نفطي	Oil Reserve
استخراج ثانوي	Secondary Recovery
استخراج في الموقع الأصلي	In-situ Production
استخراج معزز	Enhanced Recovery
امتزاز (امتصاص التصاقي)	Absorption
أنبوب تغليف (للبئر النفطي)	Casing
اندماج نووي	Nuclear Fusion
انشطار نووي	Nuclear Fission
بطانة	Lining
بلورات غاز قفصية	Gas Clathrates
بلورات غاز مائية	Gas Hydrates
بيئة	Environment
تحفيز	Catalysis

Uranium Enrichment	تخصيب اليورانيوم
Well Logging	تسجيل قياسات البئر
Hydrofracturing	تصديع مائي
Chain Reaction	تفاعل تسلسلي
Environmental Impact Assessment (EIA)	تقييم الأثر البيئي
Wind Turbine	توربين رياح
Permafrost	جليد دائم
Drilling Rig	جهاز حفر
Stratigraphy	جيولوجيا طبقية (علم)
Limestone	حجر جيري (حجر كلسي)
Sandstone	حجر رملي
Horizontal Drilling	حفر أفقي
Directional Drilling	حفر مائل
Base Load	حمل أساسي (في شبكات الكهرباء)
Lava Flow	حمم بركانية متدفقة
Fuel Cell	خلية وقود
Sedimentology	رسوبيات (علم)
Tar Sands	رمال قيرية
3-D Seismics	زلزاليات ثلاثية الأبعاد
Seismology	زلزاليات (علم)
Oil Shale	زيت السجّيل (طفل زيتي)

Log	سجل
Benchmark Price	سعر إشارة (سعر مرجعي)
Spot Price	سعر فوري
Fertilizer	سماد
Futures Market	سوق مستقبلية
Fissure	شق (جيولوجي)
Stratified Rock	صخور طباقية
Source Rocks	صخور مولِدة
Fault	صدع (جيولوجي)
Magma	صهير
Discrete Oil Phase	طور النفط الطليق
Anticline	طيّة محدبة
Catalyst	عامل حفاز
Petrology	علم البترول
Greenhouse Gas	غاز دفيئة
Solution Gas	غاز ذائب (غاز محلول)
Liquefied Natural Gas (LNG)	غاز طبيعي مسيل (بالتثليج)
Associated Gas	غاز مصاحب
Liquefied Petroleum Gas (LPG)	غاز نفطي مسيل (بالضغط)
Cap Rock	غطاء صخري
Geophysics	فيزياء الأرض (علم)

Volatility	قابلية التطاير
Base Rock	قاعدة صخرية
Dome	قبة
Gas Cap	قبة غازية
Wireline	كابل الحفر
Geochemistry	كيمياء الأرض (علم)
Drilling Cores	لباب الحفر
Viscosity	لزوجة
Drill Bit	لقمة حفر
Pesticide	مبيد حشري
Jet Engine	محرك نفاث
Porosity	مساميّة
Emulsion	مستحلب
Seismic Survey	مسح زلزالي
Lens Traps	مصيدة عدسية
Smoothed Average	معدّل ممهد (في الاحصاء)
American Petroleum Institute (API)	معهد النفط الأميركي
Reactor	مفاعل
Nuclear Reactor	مفاعل نووي
Dolomite Reservoir	مكمن حجر دولوميتي
Sandstone Reservoir	مكمن حجر رملي

Limestone Reservoir	مكمن حجر كلسي (حجر جيري)
Oil Reservoir	مكمن نفطي
Moderator	ملطف (للتفاعل النووي)
Open Pit Mine	منجم مفتوح
Logistic Curve	منحنى دلالة رمزية (منحنى لوجستي)
Offshore Platform	منصة بحرية (للحفر)
Drilling Platform	منصة حفر
Outcrop	منكشف صخري
Permeability	نفاذية
Recoverable Oil	نفط قابل للاستخراج
Aromatic Hydrocarbons	هيدروكاربونات عطرية
British Thermal Unit (BTU)	وحدة حرارية بريطانية
Depleted Uranium	يورانيوم منضب (مستنفد)

المراجع

Books

Bottjer, David. *Exceptional Fossil Preservation: A Unique View on the Evolution of Marine Life*. New York: Columbia University Press, 2002.

Campbell, Colin. *The Coming Oil Crisis*. Geneva: Multi-Science Publishing Company, 1997.

Deffeyes, Kenneth S. *Hubbert's Peak: The Impending World Oil Shortage*. Princeton: Princeton University Press, 2001.

Dyson, George. *Project Orion: The True Story of the Atomic Spaceship*. New York: Henry Holt, 2002.

Gardner, Martin. *The Annotated Alice*. New York: Bramhall House, 1960.

Gass, Saul I. *Oil and Gas Supply Modeling*. Washington, D. C.: National Bureau of Standards, 1982. (NBS Special Publication; vol. 631)

Groves, Leslie R. *Now it can be Told: The Story of the Manhattan Project*. New York: Harper, 1962.

Halbouty, Michel Thomas (ed.). *Future Petroleum Provinces of the World*. Proceedings of the Wallace E. Pratt Memorial Conference. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 1986. (AAPG memoir; 40)

Hess, Harry. *The Disposal of Radioactive Wastes on Land.* Washington, D. C.: National Academies Press, 1957.

Judson, Sheldon, Kenneth Deffeyes and Robert Hargraves. *Physical Geology.* Englewood Cliffs, N. J.: Prentice- Hall, 1976.

Kleinrock, Leonard. *Queueing Systems.* New York: Wiley, 1976.

Lewis, Gilbert N. and Merle Randall. *Thermodynamics.* 2d ed. New York: McGraw-Hill, 1961.

Maurer, William. *Novel Drilling Techniques.* Oxford: Pergamon Press, 1968.

McPhee, John. *Annals of the Former World.* New York: Farrar, Straus Giroux, 1998.

Meadows, Donella [et al.]. *The Limits to Growth.* New York: Universe Books, 1972.

Michel, Lou and Dan Herbeck. *American Terrorist: Timothy McVeigh and the Oklahoma City Bombing.* New York: Harper Collins, 2001.

Nitecki, Matthew H. (ed.). *Extinctions.* Chicago: University of Chicago Press, 1984.

Owen, Edgar Wesley. *Trek of the Oil Finders: A History of Exploration for Petroleum.* Tulsa, Okla.: American Association of Petroleum Geologists, 1975. (Memoir - American Association of Petroleum Geologists; 6)

Pais, Abraham. *«Subtle is the Lord...»: The Science and the Life of Albert Einstein.* Oxford; New York: Oxford University Press, 1982.

Reid, T. R. *The Chip.* New York: Random House, 2001.

Rhodes, Richard. *Dark Sun: The Making of the Hydrogen Bomb.* New York: Simon and Schuster, 1995.

Rifkin, Jeremy. *The Hydrogen Economy.* New York: Penguin Putnam, 2002.

Rudwick, Martin. *The Great Devonian Controversy.* Chicago: University of Chicago Press, 1975.

Shute, Nevil. *Slide Rule: The Autobiography of an Engineer.*

London: House of Stratus, 2000.

Skipper, Keith. *Petroleum Resources of Canada in the Twenty - First Century*. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 2001. (Memoir 74)

Sloan, E. Dendy. *Clathrate Hydrates of Natural Gases*. New York: M. Dekker, 1990.

Smith, Alan [et al.]. *Phanerozoic Paleocontinental World Maps*. Cambridge; New York: Cambridge University Press, 1981.

Sweet, George Elliott. *The History of Geophysical Prospecting*. Suffolk, U. K.: Neville Spearman, 1975.

USGS World Energy Assessment Team. *U.S. Geological Survey World Petroleum Assessment 2000: Description and Results*. Washington D. C.: U. S. Geological Survey, 2000.

———. *World Petroleum Assessment 2000*. [Reston, VA]: U. S. Dept. of the Interior, U. S. Geological Survey, 2000.

Wegener, Alfred. *The Origin of Continents and Oceans*. Translated from the 4th rev. German ed. by John Biram. New York: Dover, 1966.

Wells, Frederick. *The Long-Run Availability of Phosphorous*. Baltimore: Johns Hopkins Press, 1975.

Wigner, Engene. *The Recollections of Eugene P. Wigner*. New York: Plenum, 1992.

Conferences

Resources and Man. A Study and Recommendations by the Committee on Resources and Man, of the Division of Earth Sciences, National Academy of Sciences, National Research Council, with the Cooperation of the Division of Biology and Agriculture. San Francisco: W. H. Freeman, 1969.

Periodicals

Apple, R. W. «Four Nations where Forks Do knives Work.» *New York Times*: 18 February 2004.

Ball, John. «The Zoo Hypothesis.» *Icarus*: vol. 19, 1973.

Bartlett, Albert. «Thoughts on Long-Term Energy Supplies:

Scientists and the Silent Lie.» *Physics Today*: vol. 57, July 2004.

Berner, Robert. «Modeling Atmoshperic O_2 Over Phanerozoic Time.» *Geochimica et Cosmochimica Acta*: vol. 65, 2001.

Berner, R. A., A. C. Lasaga and R. M. Garrels. «The Carbonate - Silicate Geochemical Cycle and its Effect on Atmospheric Carbon Dioxide Over the Past 100 Million Years.» *American Journal of Science*: vol. 283, 1983.

Bohr, Niels and John Wheeler. «The Mechanism of Nuclear Fission.» *Physical Review*: vol. 56, 1939.

Campbell, Colin and Jean Laherrere. «The End of Cheap Oil.» *Scientific American*: vol. 278, 1998.

Clarke, F. W. «The Data of Geochemistry.» *U. S. Geological Survey Bulletin*: vol. 770, 1924.

Dilek, Yildram and Eldridge Moores. «A Tibetan Model for the Early Tertiary Western United States.» *Journal of the Geological Society*: vol. 156, 1999.

Franklin, Rosalind «The Study of the Fine Structure of Carbonaceous Solids by Measurement of True and Apparent Densities: Part 1, Coals.» *Transactions of the Faraday Society*: vol. 45, 1949.

Gulbrandsen, R. A. «Buddingtonite, Ammonium Feldspar in the Phosphoria Formation, Southeastern Idaho.» *U. S. Geological Survey Journal of Research*: vol. 2, 1974.

Hardie, Lawrence and Hans Eugster. «The Evolution of Closed-Basin Brines.» *Mineralogical Society of America*: Special Paper 3, 1970.

Hargraves, Robert. «Cross - Bedding and Ripple- Marks in Main-Bird Quartzites in the East Rand Area: A Reconnaissance Study.» *Information Circular*: vol. 5, 1961.

Hatfield, Craig. «Oil Back on the Global Agenda.» *Nature*: vol. 387, 1997.

Hubbert, M. King. «Nuclear Energy and the Fossil Fuels.» *American Petroleum Institute Drilling and Production Practice Proceedings*: Spring 1956.

Irifune, T. [et al.]. «Ultrahard Polycrystalline Diamond from Graphite.» *Nature*: vol. 421, 2003.

Judson, Sheldon. «Geological and Geographical Setting (Les Eyzies).» *American School of Prehistoric Research Bulletin*: vol. 30, 1975.

Kenney, J. F. [et al.]. «The Genesis of the Hydrocarbons and the Origin of Petroleum.» *Proceedings of the National Academy of Sciences*: vol. 99, 2002.

Kerr, R. A. «The Next Oil Crisis Looms large, and perhaps close.» *Science*: vol. 281, 1998.

Kotkin, Stephen. «What Is to Be Done?» *Financial Times*: 6 March 2004.

Laherrère, Jean. «World Oil Supply–What Goes Up Must Come Down, But When Will It Peak?» *Oil and Gas Journal*: vol. 97 1 February 2001.

Lambert, Craig. «The Hydrogen - Powered Future.» *Harvard*: vol. 106, January 2004.

Larsen, Eric and Ren Tingjin. «Synthetic Fuel by Indirect Coal Liquefaction.» *Energy for Sustainable Development*: vol. 7, 2003.

Lemley, Brad. «Anything Into Oil.» *Discover*: 24 May 2003.

Lollar, B. Sherwood [et al.]. «Abiogenic Formation of Alkanes in the Earth's Crust as a Minor Source for Global Hydrocarbon Reservoirs.» *Nature*: vol. 416, 4 April 2002.

Lynch, Michael. «Petroleum Resources Pessimism Debunked in Hubbert Model and Hubbert Modeler's Assessment.» *Oil and Gas Journal*: vol. 101, 14 July 2003.

Milton, Charles and Joseph Fahey. «Green River Mineralogy - A Historical Account.» *Wyoming Geological Association Guidebook*: 1960.

Moritis, Guntis. «Future of EOR and IOR.» *Oil and Gas Journal*: vol. 99, 14 May 2001.

Parker, H. W. «Demand, Supply will Determine when World Oil Output Peaks.» *Oil and Gas Journal*: 25 February 2002.

———. «Demand, Supply Will Determine When World Oil

Output Peaks.» *Oil and Gas Journal*: vol. 100, 11 November 2002.

Rhey, Erik. «Fuel Cells.» *PC Magazine*: vol. 22, July 2003.

Sherman, John and Murray Roth. «Linux Arrives in Upstream Computing.» *The American Oil and Gas Reporter*: November 2001.

Skinner, Brian. «A Second Iron Age Ahead?» *American Scientist*: vol. 64, 1976.

Smith, Frederick E. «Population Growth in Daphnia Magna and a New Model for Population Growth.» *Ecology*: vol. 44, 1963.

Tréhu, A. M. [et al.]. «Three-Dimensional Distribution of Gas Hydrate Beneath Southern Hydrate Ridge: Constraints from ODP Leg 204.» *Earth and Planetary Science Letters*: vol. 222, Issues 3-4, 15 June 2004.

White, David. «Some Relations in Origin Between Coal and Petroleum.» *Journal of Washington Academy of Sciences*: vol. 5, 1915.

Websites

www.federalreserve.gov.

http://home.entouch.net/dmd/ghawar.htm.

www.mms.gov.

www.princeton.edu

www.simmonsco-intl.com

Thesis

Kleinmann, Robert. «The Biogeochemistry of Acid Mine Drainage and a Method to Control Acid Formation.» (Ph. D. Thesis, Princeton University, 1979).

Reports

Deffeyes, Kenneth, Ian MacGregor and James Kukula. *Uranium Distribution in Mined Deposits and in the Earth's Crust*. Final Report Prepared for the Department of Energy, Grand Junction, Colorado, 1978.

الفهرس

ـ ط ـ

ـ ع ـ

ـ غ ـ

ـ ف ـ

المركز الإسلامي الثقافي
مكتبة سماحة آية الله العظمى
السيد محمد حسين فضل الله العامة

ما بعد النـ



- أصول المعرفة العلمية
- ثقافة علمية معاصرة
- فلسفة
- علوم إنسانية واجتماعـ
- تقنيات وعلوم تطبيقيـ
- آداب وفنون
- لسانيات ومعاجم

المنظمة العربية للـ